

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DE CARBÓN EN MINA PASO  
DIABLO CON FINES DE MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.  
CARBONES DEL GUASARE S.A., MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA.**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero de Minas  
Por el Br. Angola Lamus, Kenneth

Caracas, Junio de 2005

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DE CARBÓN EN MINA PASO  
DIABLO CON FINES DE MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.  
CARBONES DEL GUASARE S.A., MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA.**

TUTOR ACADÉMICO Prof(a). Alba Castillo

TUTOR INDUSTRIAL Ing. Orlando Arnaudez

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero de Minas  
Por el Br. Angola Lamus, Kenneth

Caracas, Junio de 2005

Caracas, Junio del 2005

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Angola Kenneth, titulado:

**“EVALUACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DE CARBÓN EN MINA PASO DIABLO CON FINES DE MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. CARBONES DEL GUASARE S.A., MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA.”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, lo declaran APROBADO.

Prof. CASTILLEJO, Miguel

Jurado

Prof. MARTIZ, Mónica

Jurado

Prof. CASTILLO, Alba

Tutor Académico

Ing. ARNAUDEZ, Orlando

Tutor Industrial

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Reinaldo Angola Millán y Mery Lamus de Angola, por tenerme paciencia y hacer de mí lo que soy hoy en día, eternamente los tendré en mi corazón.

A Diana Cubillos, mi esposa, por alentarme a terminar mis estudios con éxito, y siempre apoyarme en los momentos oportunos. A tí que siempre estarás a mi lado, para ver nuestros hijos crecer.

A mis hermanos, que siempre creyeron en mí y me apoyaron en cada decisión de mi vida.

A todos mis amigos y compañeros de estudio que de una u otra forma aportaron un granito de arena para poder culminar este trabajo, a todos ellos les doy las gracias de corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela, por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de forjarme como profesional de esta carrera, la Ingeniería de Minas, que en particular es muy interesante y completa.

A la Prof. Alba Castillo, por haber sido mi profesora amiga en estos momentos de culminación de carrera, y brindarme todo el apoyo, conocimientos y guía, para entender la importancia de este Trabajo Especial de Grado.

Al Ing. Orlando Arnaudez, por darme la oportunidad de realizar tan excelente tema de tesis, y de estar presente en aquellos momentos donde más lo necesité.

A los Profesores Manuel García y Omar Goddeliet, por sus consejos precisos y confiar en mí para la disposición de los equipos de laboratorio, para la realización de los análisis granulométricos.

Al T.S.U. Marcial Pérez, por prestar sus servicios a la hora de realizar los ensayos de análisis químicos, a muestras de carbón.

A todo el Departamento de Metalurgia Química de la Escuela de Metalurgia, en especial a los compañeros del cilindro.

A la Profesora Yolanda Lee, de la Facultad de Ciencias, por sus recomendaciones para elaborar los análisis petrográficos.

Al Ing. Carlos Alciaturi, del Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas-Centro de Investigaciones Carboníferas y Siderúrgicas (INZIT-CICASI), por su valiosa ayuda al permitirme realizar los análisis petrográficos en las instalaciones del INZIT-CICASI.

A José Enrique Solano, de Laboratorios Incolab Services de Venezuela S.A., por su gran ayuda y conocimientos en los análisis de riesgos del carbón, que incluyen el calorímetro isoperbólico, para realizar las pruebas adiabáticas.

Al Ing. Gerardo Montilva, de la Universidad Simón Bolívar, por ayudarme a entender aspectos técnicos que no lograba captar, sobre los análisis elementales.

A Maria Teresa, por colaborar con toda la información y documentación que necesité para la culminación de mis estudios y la presentación de este trabajo.

A los Ing. Robinson Ríos, Julio García, Omar Parra, Larissa Chacín, José Paredes, Antonio Ramírez, Mervin Rincón, Adrián Díaz, la T.S.U. Maria de los Angeles, entre otros, por saber comprender la importancia de mi trabajo y responderme con franqueza las dudas que tuve a lo largo del período de campo.

A los Ing. Freddy bravo, Juan Cárdenas, Rene Abreu, Cediél Vrotnesky, por darme toda su colaboración, aunque no tenían el tiempo suficiente, y brindarme su amistad incondicional.

A mis amigos y compañeros de estudio, Ramón Arnaudez, Donald Espinoza, Hildemaro Méndez, Ing. Ramses Maiolino, Javier Barrientos, Iván Álvarez, Aleida Arevalo, Angel Contreras, por confiar en mí e incentivarme a finalizar este Trabajo Especial de Grado.

**Angola L, Kenneth**

**EVALUACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DE CARBÓN EN  
MINA PASO DIABLO CON FINES DE MITIGACIÓN DE  
IMPACTO AMBIENTAL. CARBONES DEL GUASARE S.A.,  
MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA.**

**Tutor Académico Prof.(a): Alba, Castillo. Tutor Industrial Ing. Orlando  
Arnaudez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,  
Minas y Geofísica. Departamento de Minas. 2005, N<sup>o</sup> de Pág 194**

**Palabras Claves:** Carbón. Oxidación. Combustión Espontánea.  
Autocalentamiento. Fumarolas. Pilas de Almacenamiento.

**RESUMEN.** La empresa Carbones del Guasare S.A. (CDG-SA), es la encargada de la explotación de la mina Paso Diablo, en donde se desarrolla la explotación del carbón. Este proceso implica la remoción de escombros para posterior extracción de carbón, dejando así el mismo expuesta a factores del ambiente. Casi todos los productores y consumidores hacen uso de las pilas de almacenamiento en sus instalaciones bien sea por previsión a interrupciones de suministro o para permitir la mezcla de carbones para cumplir con los requerimientos del cliente. Cualquiera que sea la forma de manejar el carbón, éste tiene la facilidad de hacer contacto con el oxígeno para así comenzar a producirse la oxidación del carbón, y por consiguiente el autocalentamiento del carbón. Este trabajo analiza los mecanismos por los cuales ocurre la combustión espontánea durante la extracción de carbón y el almacenamiento. También se orienta hacia las incidencias de fuegos incontrolables en el amplio contexto geográfico y en términos del impacto de ocurrencias mayores en el ambiente global. Primeramente se describen los factores, intrínsecos y extrínsecos, que promueven el proceso de autocombustión. Luego fueron realizados al carbón algunos estudios y análisis físico-químicos, para conocerlo más a fondo y determinar las partes que lo componen y cuáles podrían estar promoviendo la combustión. Estos estudios se realizaron en dos partes: la primera, de campo y la otra, de laboratorio. Los resultados obtenidos de estos estudios, más las características geológicas, hidrológicas, topográficas, estructurales y mineras de la zona, y asociándolo a prácticas específicas realizadas en otras minas, se pudieron determinar aquellos factores que hay que tomar en cuenta para prevenir la combustión espontánea del carbón. Para finalizar se recomendó un programa que prevé las temperaturas críticas de cada manto de carbón, así como también se da a conocer un producto químico que puede ser de gran ayuda en aquellos casos que ya existan fumarolas en la zona de mina, o bien en las pilas de almacenamiento.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN -----	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA -----	3
OBJETIVOS -----	3
JUSTIFICACIÓN -----	4
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN -----	5
MARCO METODOLÓGICO -----	7
TIPO DE INVESTIGACIÓN -----	7
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN -----	7
POBLACIÓN Y MUESTRA -----	8
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS -----	8
ANÁLISIS DE LOS DATOS -----	8
<b>CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE RECURSOS AMBIENTALES -----</b>	<b>9</b>
1.1 AREA, LOCALIZACIÓN Y FISIOGRAFÍA DEL ESTADO ZULIA-----	9
1.2 RESEÑA DEL CARBÓN EN LA SIERRA DE PERIJÁ -----	10
1.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GUASARE -----	11
1.4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS Y VEGETACIÓN -----	12
1.4.1 Clima -----	12
1.4.2 Vegetación -----	13
1.4.3 Características hidrológicas -----	14
1.5 GEOLOGÍA -----	16
1.5.1 Geología regional -----	16
1.6 GEOLOGÍA LOCAL -----	19
1.7 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL -----	21
1.7.1 Fallas -----	21
1.8 RECURSOS GEOLÓGICOS -----	22



<b>CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DE CARBONES DEL GUASARE S.A.</b>	<b>24</b>
2.1 RESEÑA HISTÓRICA SOBRE LA CUENCA CARBONÍFERA DEL GUASARE	24
2.2 UBICACIÓN Y ACCESO A LA MINA	26
2.3 RESERVAS MINERALES	29
2.3.1 Reservas minerales tipo <i>Run of Mine</i> (ROM)	32
2.4 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN	34
2.4.1 Flota de equipos mineros	37
2.4.2 Operaciones básicas de minería	39
<b>CAPÍTULO III. CONSIDERACIONES DEL CARBÓN</b>	<b>44</b>
3.1 CARBÓN	44
3.1.1 Características y propiedades del carbón	45
3.1.2 Clasificación del carbón	45
3.1.3 Normas <i>American Society for Testing and Material</i> (ASTM) de clasificación de carbones	47
3.2 COMBUSTIÓN DEL CARBÓN	47
3.2.1 Tipos de combustión del carbón	48
3.2.2 Resultados de la combustión del carbón	48
3.3 TRIÁNGULO Y TETRAEDRO DEL FUEGO	51
3.4 EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN	52
3.5 CONCEPTO DE FUEGOS DE MINA Y PROBLEMAS ASOCIADOS	54
3.5.1 Problemas asociados a los fuegos de mina	55
3.6 TEORÍAS SOBRE LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN	60
3.6.1 El Autocalentamiento del carbón	61
3.6.2 Físico-química del autocalentamiento del carbón	62
3.7 MECANISMOS DE LA REACCIÓN	64
3.8 CONDICIONES PARA LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN	66
3.9 PRINCIPALES FACTORES INCIDENTES EN LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN	67

3.9.1 Factores derivados de las características genéticas y naturales del yacimiento	68
3.9.2 Factores derivados del método y condiciones de la explotación	74
3.9.3 El desprendimiento de monóxido de carbono	75
3.10 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUEGOS	77
3.10.1 Observación de síntomas físicos	78
3.10.2 Análisis del aire de la mina	79
3.11 CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS	79
3.12 CONSIDERACIONES LEGALES	80
3.12.1 Decreto 638 Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica	80
3.12.2 Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos	82
<b>CAPÍTULO IV. RECONOCIMIENTO EN CAMPO</b>	<b>85</b>
4.1 SELECCIÓN DE SITIOS DE OBSERVACIÓN EN FOSA BAQUETA	85
4.2 TOMA DE MUESTRAS DE CARBÓN	96
4.2.1 Metodología de la toma de muestras de carbón	96
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	97
4.3.1 Descripción mineralógica	97
4.3.2 Descripción megascópica	97
4.4 CARACTERIZACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA E HIDROGEOLOGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	98
4.4.1 Programa de monitoreo de aguas subterráneas	98
4.4.2 Monitoreo de la calidad del aire	102
4.4.3 Monitoreo de precipitaciones	108
4.5 MONITOREO DE AGUA SUBTERRANEA CON PIEZÓMETROS	110
4.6 CONSIDERACIONES GEOESTRUCTURALES EN LA FOSA BAQUETA	112
<b>CAPÍTULO V. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN</b>	<b>121</b>
5.1 ANÁLISIS INMEDIATO DEL CARBÓN	121
5.1.1 Contenido de humedad inherente	122
5.1.2 Contenido de cenizas	122

5.1.3 Contenido de materia volátil -----	123
5.1.4 Contenido de carbono fijo -----	123
5.2 PODER CALORÍFICO -----	124
5.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL CARBÓN -----	124
5.4 ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL CARBÓN -----	127
5.5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO -----	128
5.5.1 Componentes del carbón -----	129
5.5.2 Proceso de maceración del carbón -----	129
5.5.3 Análisis de macerales -----	133
5.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO -----	133
5.6.1 Generalidades -----	133
5.7 ANÁLISIS DE VALORACIÓN DE RIESGOS -----	134
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS DE LABORATORIO -----</b>	<b>136</b>
6.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS INMEDIATOS Y ELEMENTALES ----	136
6.2 ANÁLISIS MINERALÓGICO -----	146
6.2.1 Contenido de pirita -----	146
6.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO -----	148
6.4 ANÁLISIS PETROGRÁFICO -----	153
6.4.1 Resultados de las mediciones de los macerales -----	154
6.4.2 Resultados de la reflectancia de la vitrinita -----	156
6.5 ANÁLISIS DE VALORIZACIÓN DE RIESGOS -----	158
<b>CAPÍTULO VII. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN -----</b>	<b>163</b>
7.1 PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN EN MANTOS DE CARBÓN -----	163
7.1.1 Consideraciones generales -----	163
7.1.2 Mantos sellantes -----	165
7.1.3 Otras prácticas -----	167
7.1.4 SPONCOM: Simulador de potencialidad de combustión del carbón -----	167
7.2 PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN EN PILAS DE CARBÓN -----	175
CONCLUSIONES -----	180

RECOMENDACIONES -----	186
BIBLIOHEMEROGRAFÍAS -----	190
ANEXOS -----	194

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones hidrográficas en el Noreste de Venezuela-----	15
Figura 2. Columna Estratigráfica tipo de la mina Paso Diablo-----	20
Figura 3. Corte con sección tipo de la mina Paso Diablo-----	22
Figura 4. Recursos geológicos de mineral de carbón presentes en Venezuela-----	23
Figura 5. Mapa de ubicación relativa de la Cuenca Carbonífera del Guasare-----	27
Figura 6. Mapa con la configuración general de la mina Paso Diablo-----	28
Figura 7. Reservas de mineral de carbón de la Cuenca Carbonífera del Guasare-----	29
Figura 8. Paneles de trabajo empleados en la planificación de la mina Paso Diablo-----	36
Figura 9. Diagrama de operaciones básicas de la mina Paso Diablo-----	40
Figura 10. Diagrama con los usos del carbón mineral-----	46
Figura 11. Clasificación del carbón según su poder calorífico-----	47
Figura 12. Esquema con triángulo y tetraedro de fuego-----	52
Figura 13. Principales impactos de la minería del carbón en la hidrósfera-----	58
Figura 14. Principales impactos de la minería del carbón en la atmósfera-----	59
Figura 15. Imagen de zona perimetral sur, donde se observa la autocombustión de la zona 1-----	91
Figura 16. Imagen mostrando la zona 1, donde se observa como ha abarcado mayor área hacia la pendiente-----	92
Figura 17. Imagen del nivel -36 (zona 2), hacia el Norte del grupo 6. Se observa como se remueve el material en llamas-----	92
Figura 18. Imagen donde se observa la zona 3, cerca de la pared Este-----	93
Figura 19. Imagen donde se aprecia la zona 3. Se tuvo que usar maquinaria pesada para remover el material caliente-----	93
Figura 20. Imagen que muestra la gran emisión de gases de la zona 4, cerca de la pared Oeste-----	94
Figura 21. Imagen de la zona 4, visto desde la pared Este. El material afectado es el grupo 4-----	94

Figura 22. Imagen de la zona 5, ubicada en la pared Este de la laguna de sedimentación. Se observa en proceso de apagamiento-----	95
Figura 23. Imagen de la zona 5, se observa en proceso de apagamiento-----	95
Figura 24. Concentración pH del agua subterránea y superficial, medidas en los diferentes puntos-----	99
Figura 25. Relación de contenido de sulfatos y hierro en las aguas subterráneas y superficiales-----	100
Figura 26. Relación de contenido de oxígeno disuelto y la temperatura de las aguas subterráneas y superficiales-----	101
Figura 27. Rosa de los vientos de la estación Carichuano. Se establece la relación entre la velocidad y la dirección de los vientos-----	103
Figura 28. Medida total y media de la radiación directa y difusa de los rayos solares, en la estación Carichuano-----	104
Figura 29. Rosa de los vientos de la estación El Carbón. Se establece relación entre las velocidades y las temperaturas-----	105
Figura 30. Relación de las temperaturas máximas y mínimas del ambiente, en la estación El Carbón-----	105
Figura 31. Contenido de humedad relativa del aire. Medida en la estación El Carbón -----	106
Figura 32. Precipitaciones correspondientes al año 2004-----	109
Figura 33. Precipitaciones totales anuales, correspondientes al período de 1989 hasta el 2004-----	110
Figura 34. Ubicación de los Piezómetros PGH-001, PGH-002 y PGH-003-----	111
Figura 35. Ubicación de los Piezómetros PGH-004, PGH-005 y PGH-006-----	112
Figura 36. Corte Geológico del Sindinal de Manuelote-----	113
Figura 37. Mapa de la Fosa Baqueta, donde se muestran las secciones geoestructurales-----	115
Figura 38. Sección 1, donde se observa actualmente el punto caliente de la perimetral Sur -----	116

Figura 39. Sección 6, donde aparece corredor de fallas. Se observa como atraviesan los mantos de carbón-----	117
Figura 40. Sección 7 mostrando fallas que atraviesan los grupos 6 y 7. Promoviendo así la combustión espontánea-----	118
Figura 41. Sección 8, donde se observa la presencia de corredor de fallas-----	119
Figura 42. Sección 9 con presencia de corredor de fallas. Pared límite Norte -----	120
Figura 43. Clasificación del carbón según su poder calorífico en muestras de Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	138
Figura 44. Contenidos de oxígeno, humedad inherente y materia volátil de muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	139
Figura 45. Contenido de materia volátil de muestras de carbón en fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	140
Figura 46. Contenido de oxígeno de muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	141
Figura 47. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 4O al 4M2 -----	142
Figura 48. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 4O al 5N9 -----	142
Figura 49. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 6K al 6Q -----	143
Figura 50. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 7O al 8I -----	143
Figura 51. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 9Q al 11M -----	144
Figura 52. Contenido de cenizas en las muestras de carbón en Fosa Baqueta en mina Paso Diablo -----	144
Figura 53. Contenido de humedad inherente en las muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	146
Figura 54. Porcentaje de piritita en diferentes muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	147

Figura 55. Gráfico trituración primaria muestra de carbón de manto 4O -----	149
Figura 56. Grafico trituración secundaria de muestra de carbón de manto 4O -----	149
Figura 57. Gráfico trituración primaria muestra de carbón de manto 5O -----	150
Figura 58. Gráfico trituración secundaria muestra de carbón de manto 5O -----	150
Figura 59. Gráfico trituración primaria muestra de carbón de manto 7M -----	151
Figura 60. Gráfico trituración secundaria muestra de carbón de manto 7M -----	151
Figura 61. Gráfico trituración primaria muestra de carbón de manto 6M -----	152
Figura 62. Gráfico trituración secundaria muestra de carbón de manto 6M-----	152
Figura 63. Trimacerita: asociación de los tres macerales principales Vitrinita, Exinita e Inertinita observados en el manto 4O -----	154
Figura 64. Capas de Vitrinita con aporte de Inertinita observados en el manto 5O-----	155
Figura 65. Fusinita en el rango de Inertinita observado en el manto 6M -----	155
Figura 66. Vitrinita con intercalaciones de matriz mineral observado en el manto 7M-----	156
Figura 67. Gráfica de temperatura de ignición de los mantos en Fosa Baqueta-----	159
Figura 68. Gráfica de potencialidad de autocalentamiento de los mantos en Fosa Baqueta-----	160
Figura 69. Curvas de autocalentamiento de muestras 1, 2, 3 y 4 -----	161
Figura 70. Principales flujos químicos y físicos durante el autocalentamiento del carbón-----	164
Figura 71. Pantalla de inicio del programa SPONCOM-----	168
Figura 72. Pantalla de carga de nuevo archivo o existente-----	169
Figura 73. Pantalla de llenado de información-----	169
Figura 74. Pantalla de menú principal-----	170
Figura 75. Pantallas de propiedades del carbón-----	170
Figura 76. Segunda pantalla de propiedades del carbón-----	171
Figura 77. Pantalla para características geológicas-----	171
Figura 78. Segunda pantalla para características geológicas-----	172
Figura 79. Tercera pantalla para características geológicas-----	172
Figura 80. Pantalla de condiciones mineras-----	173



Figura 81. Segunda pantalla de condiciones mineras-----	173
Figura 82. Pantalla de práctica minera-----	174
Figura 83. Pantalla donde se muestra el resultado-----	174

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidades por manto de carbón-----	31
Tabla 2. Factores de recuperación del carbón, pérdida y dilución por manto (ROM) -----	32
Tabla 3. Calidad de dilución asumida-----	33
Tabla 4. Equipos de Acarreo-----	37
Tabla 5. Flota de Palas-----	37
Tabla 6. Flota de perforadoras-----	37
Tabla 7. Flota de Cargadores-----	38
Tabla 8. Flota de tractores de orugas-----	38
Tabla 9. Flota de motoniveladoras-----	38
Tabla 10. Flota de equipos de riego-----	38
Tabla 11. Flota de tractores de ruedas ( <i>TIGER</i> ) -----	38
Tabla 12. Límite permisible de los contaminantes del aire -----	81
Tabla 13. Clasificación de zonas según los rangos de concentraciones PTS-----	81
Tabla 14. Condiciones instrumentales para medir la cantidad de mineral en una muestra -----	128
Tabla 15. Grupo de macerales -----	132
Tabla 16. Valores de los análisis inmediatos de cada manto -----	136
Tabla 17. Valores de los análisis elementales de cada manto -----	137
Tabla 18. Contenido de Pirita en las muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo -----	147
Tabla 19. Temperatura de ignición de los mantos en la Fosa Baqueta -----	159
Tabla 20. Potencialidad de Autocalentamiento de los mantos en Fosa Baqueta ---	160
Tabla 21. Tasas comparativas de oxidación y calentamiento de carbones por su rango -----	162

## INTRODUCCIÓN

El término “combustión espontánea” se entiende por el autocalentamiento del carbón o de cualquier sustancia fácilmente oxidable debido a la auto-oxidación a temperatura atmosférica.

La mayoría de los investigadores estudiaron el tema desde las consideraciones tanto químicas como físicas bajo condiciones isotérmicas y adiabáticas. Las teorías más importantes de la combustión espontánea que han sido adelantadas son: La teoría de la pirita (Plot, 1950), la teoría bacteriana (Potter, 1975) y la teoría del complejo carbono-oxígeno (Kamneva y Aleksandrov, 1990).

La combustión espontánea plantea un problema de seguridad industrial integral, ambiental, económico y de manejo, si éste se establece en los mantos de carbón. Así como la pérdida económica de carbón, debido al fuego, el calor que afecta al carbón puede convertirse parcial o totalmente inaceptable para el uso planificado. Así, la prevención y temprana detección de la combustión espontánea potencial es de suma importancia.

La prevención y el control de la combustión espontánea puede ser lograda con el entendimiento de los factores que aumentan el potencial de autocalentamiento, supervisando para una temprana detección de combustión espontánea y una rápida respuesta en el momento del fuego.

Conociendo los factores que intervienen en el proceso de combustión, como son: el combustible, el comburente y la temperatura de ignición, se puede determinar químicamente el comportamiento de este fenómeno y, creando un modelo geoquímico del proceso, es posible presentar una solución para controlar dicho fenómeno.

El autocalentamiento del carbón es resultante de un número de complejas reacciones exotérmicas. El carbón se mantendrá en autocalentamiento si el suministro de oxígeno y la producción de calor no se disipan. Los parámetros que controlan la propensidad del carbón para autocalentarse han sido el propósito de muchas investigaciones, pero ninguna de ellas logró llegar a una conclusión certera. Éste fue uno de los principales retos al realizar este trabajo de

investigación, dado que fue necesario complementar vacíos con información obtenida de los ensayos realizados en laboratorio para determinar aquellos factores que se consideraron los promotores más importantes de la combustión del carbón.

Con la realización del presente trabajo se espera lograr un cambio positivo para la operadora CDG, SA, ya que actualmente se percibe a la minería como una actividad de reputación cuestionable y muy degradante, destructiva y dañina para el ambiente. Por tal razón es importante prevenir los impactos producidos por la misma y obtener una mayor calidad de vida tanto para la comunidad minera como para la población adyacente a la mina.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En la industria minera del Carbón se presentan entre otros graves problemas: la combustión espontánea del mismo. Dicha combustión sucede no sólo en el manto de Carbón, sino que también se presenta en las pilas de almacenamiento expuestas al aire libre.

Los incendios en Carbón autoiniciados pueden llegar a ser muy peligrosos para los mineros y ocasionar grandes impactos al ambiente así como también producir pérdidas económicas y de calidad ambiental.

Las causas de este fenómeno no son suficientemente conocidas; sin embargo se acepta, de acuerdo a diversas investigaciones, que el carbón tiene la propiedad de reaccionar con el oxígeno a temperaturas bajas. Bajo ciertas circunstancias puede acumularse el calor, acompañando a este proceso de oxidación que ocasiona el autocalentamiento y potenciando la aceleración del proceso mismo, conduciendo a la generación del fuego

Este problema se presenta en la Mina Paso Diablo, operada por CDG-SA, en el Municipio Mara, en el estado Zulia. Debido al autocalentamiento del carbón se están produciendo emisiones de gases potencialmente tóxicos y pérdidas considerables del mineral, impidiendo el trabajo eficiente en la mina, e inhibiendo lo relativo al aprovechamiento integral del patrimonio geológico minero y a la protección de la calidad ambiental.

## **OBJETIVOS.**

### **Objetivo General.**

Evaluar la combustión espontánea del carbón en Mina Paso Diablo con fines de evitar las pérdidas de reservas minerales y a su vez prevenir y/o mitigar los impactos ambientales ocasionados por la emisión de gases de la combustión.

### **Objetivos Específicos.**

- Identificar las características generales de la naturaleza física, mineralógica, química y térmica del carbón en mina Paso Diablo.

- Describir las características geológicas del yacimiento y la técnica minera empleada.
- Realizar técnicas exploratorias en zonas donde existe el problema de autocombustión y llevar a cabo la toma de muestras para análisis.
- Desarrollar análisis petrográficos, análisis granulométricos, análisis inmediatos, análisis elementales, análisis de las cenizas y análisis mineralógico, en muestras obtenidas a partir de las técnicas exploratorias.
- Analizar los resultados obtenidos para presentar un modelo fisicoquímico que explique la causa de la autocombustión del carbón.
- Establecer la relación causa-efecto de la autocombustión del carbón.
- Recomendar medidas y prácticas para prevención y/o mitigación de las causas de autocombustión del carbón.

## **JUSTIFICACIÓN.**

Las evaluaciones de impacto ambiental tienen como objeto prever las alteraciones que sobre el ambiente va a inducir la realización de determinadas acciones, según planes y proyectos de aprovechamiento mineral, con el fin de adoptar medidas preventivas y/o mitigantes de impactos negativos antes de que éstos se produzcan.

Un problema adicional que en la extracción de carbones ocurren durante el transporte y almacenamiento es la combustión espontánea. Éste problema es particularmente peligroso cuando el carbón incluye o consiste en partículas muy finas. Estos peligros de combustión están allí sólo debido a la presencia de humedad y oxígeno en la atmósfera que rodean las partículas de material. Si los niveles de humedad y oxígeno pueden ser rebajados y mantenidos, el riesgo de la combustión espontánea o cualquier forma de ignición es totalmente eliminada.

Al realizar los análisis correspondientes a las muestras tomadas en las áreas donde se producen mayormente los eventos se pueden determinar los factores que intervienen en la autocombustión del carbón y a su vez cuáles medidas se pueden aplicar para eliminar el problema.

La determinación de las causas de la autocombustión del carbón y su posible eliminación, constituyen procesos que tienden a reestablecer el equilibrio ambiental para las poblaciones adyacentes que sufren por los gases tóxicos, así como también a prevenir la pérdida de material y optimizar el proceso de producción. Por otra parte, debido a que es un problema potencial en otras minas de la región, podríamos resolver el problema no sólo en la Mina Paso Diablo, sino también en aquellas minas donde se fuera necesario.

### **ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.**

**Abreu, Rene (1976)** Ensayos de Explosividad de Polvo de Carbón y su Aplicación en la Prevención de Explosiones. Minas de Naricual. Edo. Anzoátegui. Venezuela. Tesis UCV, Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Este trabajo consiste en la elaboración de un programa definitivo de prevención de explosiones en minas, así como también instrumento de guía en la iniciación del estudio del tema. Esto se obtuvo realizando análisis al polvo de carbón y ensayos de explosividad, para luego aplicar los datos obtenidos en la prevención de las explosiones.

**Bolívar A., Luis G. (1997)** Medidas de Prevención/Mitigación del Impacto Ambiental Producido en la Explotación del Carbón, Mina Paso Diablo, Carbones del Guasare S.A. Tesis UCV, Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Consiste en aportar recomendaciones para el control y manejo de desechos generados por la explotación a cielo abierto del carbón, contribuyendo a mejorar la competitividad de la explotación, en términos de conservación ambiental.

**Fermín A., Aída A. (1999)** Efectos Ambientales de la Extracción de Carbón en Minas a Cielo Abierto en el Municipio Lobatera. Tesis, UCV, Facultad de Humanidades. Escuela de Geografía.

El trabajo contiene un diagnóstico de los efectos que ha generado la extracción de carbón, realizando estudios ambientales en la región, con el objetivo fundamental de brindar alternativas de un uso racional y equilibrado de los recursos para la conservación del medio.

**Hurtado C., Aisha M. (2001)** Estudio Geoquímico de Rocas Pirometamórficas Producto de la Combustión Natural de Carbón en la Formación Cerro Pelado, Edo. Falcón. Tesis, UCV, Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

En el trabajo se estudiaron los cambios químicos, mineralógicos y texturales que ocurren en los carbones naturales cuando experimentan combustión espontánea, a través del análisis químico y mineralógico y mediante el uso de técnicas de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de emisión atómica.

**Soto, David (1997)** Fumarolas del estado Lara: Estudio Geológico de los Procesos de Combustión Espontánea de Rocas Carbonosas. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geología. Venezuela.

El trabajo se basa en la recopilación y descripción geológica de la zona del estado Lara, donde se encuentran rocas carbonosas. Se describen varias zonas del estado Lara y se detallan los factores más relevantes que pueden producir la combustión espontánea del carbón. Se hacen tomas de muestras en varias zonas y se les realizan análisis y así hacer una comparación para determinar que lugares son más propensos a la combustión espontánea.

**Van Zanten, Johan (2004)** Diseño de Manejo de Agua de Mina, en el *Pit* Baqueta de la Mina Paso Diablo, Edo. Zulia, como Aporte al Desarrollo Sustentable de la Región. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Minas. Venezuela.



El trabajo propone la construcción de obras de drenaje para conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión hídrica. El propósito del manejo de agua de mina es evitar las inundaciones, que ocurren frecuentemente en los periodos de precipitación, con la misión y visión de conservación ambiental e inserción de la actividad minera en el concepto de sustentabilidad.

## **MARCO METODOLOGICO.**

### **TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

Este trabajo es de tipo Exploratorio, ya que la autocombustión del carbón es un tema discutido a nivel mundial, es decir, sobre las causas que lo incitan a producirse y los efectos que ocasiona a la población minera y población adyacente a la mina. En esta oportunidad, en la Mina Paso Diablo se actúa en controlar el problema, se realiza la investigación acerca de sus posibles causas y se determinó que medidas se deben tomar para prevenir y/o mitigar la autocombustión del carbón.

Así, finalmente, la investigación también es del tipo Explicativo, debido a los diversos análisis a practicar en las muestras y a través de un enfoque cuantitativo se puede responder a las causas que producen la combustión espontánea del carbón y recomendar estrategias para su prevención y control.

### **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

El diseño No Experimental se ajusta a la presente investigación, dado que se observa el fenómeno tal y como se da y se realizan distintos análisis a muestras. En primer lugar, con la determinación fisicoquímica de varios parámetros concernientes a la investigación. Previamente, se realizó un levantamiento detallado de parámetros geológicos de estructuras en el macizo rocoso y de características hidrogeológicas y toma de muestras.

## **POBLACIÓN Y MUESTRA.**

La población que se manejó en este trabajo investigativo está constituida por los mantos y pilas de almacenamiento que frecuentemente presentan problemas de autocombustión de carbón. La muestra está constituida por las porciones de material muestreado en cada uno de los principales mantos de carbón donde existe el problema.

## **TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.**

Los análisis que se realizaron para la recolección de datos del presente trabajo especial de grado son:

- Levantamiento Topográfico.
- Levantamiento Geológico-Estructural.
- Evaluación Hidrogeológica.
- Recuperación de muestras imperturbadas de roca.
- Análisis Granulométrico.
- Análisis Físicoquímicos.

## **ANÁLISIS DE LOS DATOS.**

La realización de análisis en muestras de carbón recolectadas, resultó en una serie de datos que conjuntamente con las condiciones in situ permitieron obtener resultados para la discusión y las recomendaciones.

A partir de estos resultados se determinaron las causas que inician la autocombustión del carbón, y permitió proponer estrategias para evitar ese proceso y optimizar, tanto la producción, como gestión de la calidad ambiental en la mina.

## **CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE RECURSOS AMBIENTALES**

En esta sección se ofrece una descripción de algunas características del área en donde se realizó el estudio. Comenzando por aspectos del Estado Zulia y sus límites territoriales. También se ofrece una reseña del carbón en la Sierra de Perijá, así como de la geología regional y local, la Cuenca Carbonífera del Guasare. Para concluir con información perteneciente a los recursos energéticos y las reservas medidas en la cuenca Carbonífera del Guasare.

### **1.1 AREA, LOCALIZACIÓN Y FISIOGRAFIA DEL ESTADO ZULIA**

Según Microsoft Encarta (2003) el estado Zulia está situado al Noroeste de Venezuela, en los límites con Colombia; tiene 63.100 km<sup>2</sup> de la superficie total del país. Está limitado al Norte por el golfo de Venezuela, al Sur por los estados Mérida y Táchira y la República de Colombia; al Este por los estados Falcón, Lara y Trujillo y al Oeste por la República de Colombia.

El Lago de Maracaibo, con 12.870 km<sup>2</sup>, comunica con el mar Caribe a través del Golfo de Venezuela, accesible para barcos de gran calado mediante un canal construido de 33 km de largo por 300 m de ancho y 11 m de profundidad.

El Estado Zulia está dividido en 10 distritos y 41 municipios, y su capital es la ciudad de Maracaibo. Integra la llamada Región Zuliana y puede decirse que es la única región de Venezuela cuyos límites coinciden con la división política territorial del Estado.

La región coincide aproximadamente con la cuenca hidrográfica del Lago de Maracaibo, cuyos accidentes principales son la sierra de Perijá al Oeste y las estribaciones andinas de las sierras de Lara y Falcón al Este. Entre éstas dos formaciones se encuentran terrenos planos y ondulados, en cuyo centro está el lago de Maracaibo, que se comunica con el golfo de Venezuela.

El Norte de la región es predominantemente llano, de suelos pobres y severas condiciones de aridez. Entre la costa occidental del lago y el piedemonte de la sierra

de Perijá se encuentran planicies y terrenos ondulados de distintas condiciones de fertilidad y régimen de lluvias parcialmente deficitario. En el extremo Oeste de la región, la sierra de Perijá es de topografía montañosa, con alturas de hasta 3.700 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Al Suroeste de la costa del lago de Maracaibo, las ciénagas de Juan Manuel constituyen un área de singular significación por su flora y fauna. Al Sur del lago de Maracaibo se encuentra una de las áreas de la región de mayor valor productivo agropecuario, aunque presenta algunas limitaciones de drenaje. Entre la costa oriental del lago y el piedemonte andino se presentan terrenos ondulados, valles planos y áreas escarpadas que llegan a alturas de 1.500 msnm.

## **1.2 RESEÑA DEL CARBÓN EN LA SIERRA DE PERIJÁ**

Según González de Juana (1983) la bifurcación que sufre la cordillera oriental de Colombia en el páramo de Tamá tiene un ramal que con rumbo N-NE penetra en Venezuela y constituye la llamada sierra de Perijá y su extensión en la península de La Guajira, de la cual queda separada por un accidente tectónico constituido por la falla de Oca, que separa indirectamente las formaciones de la sierra de Perijá y de la península de La Guajira.

La sierra de Perijá, que tiene unos 18.000 km<sup>2</sup>, constituye la divisoria estructural entre el Lago de Maracaibo, hacia la parte de Venezuela, y el río Magdalena hacia la parte de Colombia. El levantamiento de la sierra de Perijá se puede considerar como un *horst* tectónico alargado en dirección noreste.

En esta región, al igual que en la región de los Andes, se presentan también formaciones que abarcan desde el Precámbrico hasta el Reciente, constituidas por rocas ígneas metamorfizadas y rocas sedimentarias.

En la sierra de Perijá todavía se encuentra casi la mitad de las 1.300 especies de aves que habitan en Venezuela. Aún es el hábitat natural de especies en peligro de extinción como el oso frontino, la danta, el jaguar, el cóndor de Los Andes, el paují copete de piedra, el caimán de la costa, etc. Recibe aves migratorias de Norteamérica

y otros continentes. Sirve de refugio a especies de mamíferos que representan la mitad de los órdenes existentes en el mundo. Además, es un sistema natural con un alto grado de endemismo, vale decir, con presencia de especies faunísticas y florísticas únicas en el mundo. Investigaciones preliminares de La Universidad del Zulia (LUZ) lograron el descubrimiento de unas catorce especies nuevas para la humanidad, en una exploración realizada tan solo en la zona baja, y se tiene por cierto que en los pisos medios y altos de la cordillera se encuentren miles de nuevas especies y variedades desconocidas de gran utilidad para la ciencia.

A la vez, presenta un alto valor geopolítico y geoeconómico, pues posee ricos yacimientos de petróleo, carbón, bauxita, fosfato, oro, tungsteno, magnesio, zinc, níquel, cobre, yeso, caolín, barita, feldespato, y calizas. Inclusive, se tiene certeza de la existencia de mineral de uranio entre otros minerales "estratégicos".

Los yacimientos de carbón se encuentran en las colinas y valles ondulados al pie del flanco oriental de la sierra de Perijá, con altura que varía entre 50 y 300 msnm. Se extiende hacia el norte del valle del río Guasare y continúa hasta el sur por el valle del río Socuy, terminando en el valle del río Cachimí, o sea que cubre una sección N-S de todo el distrito Mara, con extensiones menores en los distritos Páez y Maracaibo.

### **1.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GUASARE**

De acuerdo con un análisis hipsométrico realizado en la mina Paso Diablo se llegó a la conclusión de que el sector "Baqueta", en cuanto a su altitud se refiere, viene a formar parte del relieve del piedemonte perteneciente a la cuenca del río Guasare, la cual constituye una zona de altitud moderada cuyas partes más bajas se encuentran entre los 80 y 100 msnm y las más elevadas alcanzan altitudes de unos 220 msnm.

Esta área se caracteriza por presentar:

- Una zona plana y suavemente inclinada, cuyas pendientes no son mayores de un 7%.
- Una zona que viene a ser la parte más accidentada del área estudiada, formada por algunas montañas adyacentes a los caños y cuyas pendientes sobrepasan el 20%.
- El sector donde se encuentra la mina, está constituido por colinas y valles con elevaciones máximas de 200 msnm y cota media de 150 msnm.

## **1.4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS Y VEGETACIÓN**

### **1.4.1 Clima**

Los datos básicos considerados como parámetros climatológicos son: la precipitación, la temperatura y la evaporación.

#### **Precipitación:**

A partir de histogramas de precipitación de la estación climatológica El Carbón, la distribución media mensual para seis años (periodo 1998 – 2004) es bimodal; las máximas precipitaciones se producen entre los meses de abril a mayo y de septiembre a noviembre y las mínimas se registran entre los meses de diciembre a marzo y de junio a agosto, con un promedio anual de 1.318,4 mm.

Las precipitaciones anuales en la estación El Carbón son muy variables, particularmente entre 1998 y el resto de los años siguientes. En el año 1998 la precipitación anual fue de 1.156 mm; en cambio en el resto de los años varía entre 1.705 mm (1999) y 754.1 mm (2002).

En la estación Carichuano para el período de seis años (1998 – 2004), la distribución mensual de las precipitaciones también es bimodal, muy similar a la estación El Carbón con máximos entre los meses de abril a mayo y de agosto a noviembre; en cambio los mínimos se registran entre los meses de diciembre a marzo

y junio a julio. El promedio anual para este período es de 1.180,3 mm, el cual tiene poca diferencia con relación al último período evaluado 1994 – 1998.

El año pasado se abrió una nueva estación de estudio denominada Dispatch. Con este nuevo punto se observa un patrón de distribución desigual a las otras dos estaciones. El promedio anual para 2003, fue de 781,1, muy pequeño en comparación con las demás estaciones.

### **Temperatura:**

La temperatura mínima media varía entre 21,1 °C, con un promedio anual de 23,5 °C en la estación El Carbón y entre 21,6 °C y 24,4 °C, con un promedio anual de 23,1 °C en la estación Carichuano. La temperatura máxima media varía entre 31,5 °C y 35,2 °C con un promedio anual de 32,5 °C para la segunda. La temperatura media anual varía entre 26,3 °C y 29,9 °C, con un promedio anual de 28,3 °C y entre 26,2 °C y 29,1 °C, con un promedio anual de 27,8 °C respectivamente. La diferencia de la temperatura media con la relación a la máxima y la mínima es cerca de  $\pm 5$  °C.

### **Evaporación:**

Las distribuciones mensuales de la evaporación potencial en las estaciones El Carbón y Carichuano son similares. Estas distribuciones son bimodales, con máximos entre los meses de marzo a abril y de junio a septiembre y los mínimos entre octubre y febrero y el mes de mayo. Los promedios anuales para la primera estación son de 1.985,1 mm y de 1.958,5 mm para la segunda. Los meses con evaporaciones más altas coinciden con los meses de mayor temperatura. Los promedios de evaporación son mayores que los de precipitación, con lo cual se observa un déficit hídrico en la zona de estudio.

## **1.4.2 Vegetación**

La vegetación natural observada en los alrededores de la mina está constituida en su mayoría por especies deciduas (que pierden por completo las hojas), de capas

redondas a semiplanas, de moderada densidad y con un dosel relativamente poco compacto (Informe Técnico, 2000, Inédito). La vegetación de la zona está caracterizada por especies de porte mediano, bajo o rastrero, dado el alto grado de intervención a que fue sometida la misma en épocas pasadas, cuando fueron extraídas grandes cantidades de material comercial para surtir el aserrío (sitio donde se convierte la madera en tablas, tablones, durmientes, vigas, etc) de la zona. Los mayores vestigios se observan en la zona protectora de los cursos de agua que le sirven de linderos a la referida área de terrenos.

La vegetación de la zona en las áreas planas puede diferenciarse en tres (3) estratos bien definidos: un estrato superior o arbóreo representado por individuos aislados de algunas especies tales como: Jabilla, Vera, Canalete, Curarire, Lara o Saman, Carreto, Penda, Cacahuito, por especies herbarias y la regeneración natural de algunas especies del estrato superior.

### **1.4.3 Características Hidrológicas**

La expresión del relieve refleja en gran parte la composición y la orientación de la estratificación de las rocas sedimentarias, así como las principales estructuras geológicas; en este sentido, se observan colinas de distintos tamaños, con su cuesta y contracuesta de buzamiento, tal como aparece claramente definido al Norte y Este del área estudiada, en la Fila del Norte paralela al Caño Planeta y a las colinas bajas adyacentes a las vías, entre Caño Baqueta, Caño Izquierdo y Caño Derecho. Así mismo, se localizan alineamientos depresivos coincidentes con trazas de fallas por donde drenan algunos caños, formando segmentos de cauce recto y con cruces ortogonales. La mayor parte del área, aproximadamente el 60%, posee drenaje de tipo dendrítico, como una consecuencia de la unidad litológica; incluyendo tanto la roca quemada como la roca no afectada por la calcinación (Informe Técnico de CDG-SA, 2000, Inédito).



Los caños son de curso intermitente, presentándose en los principales (Planeta, Colorado y Baqueta) un notable flujo; en los dos primeros se observan depósitos de travertino o tufas calcáreas, dispuestas escalonadamente, a lo largo de todo cauce, las cuales permiten la formación de lagunas.

En general, el drenaje está correlacionado principalmente con la resistencia, la permeabilidad y la erosión de los estratos de roca existentes, siendo éste de tipo dendrítico, de moderada densidad y en su mayor parte de tipo estacional (Ver Figura 1).

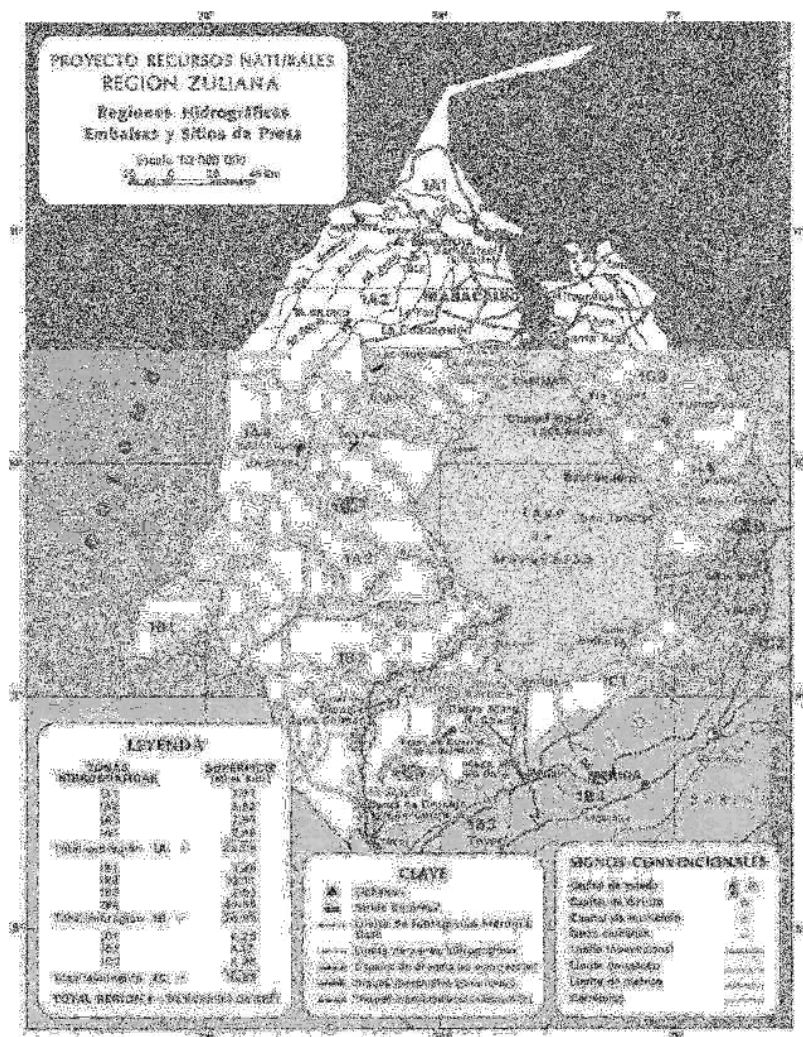


Figura 1. Regiones Hidrográficas en el noroeste de Venezuela.

Fuente: Léxico estratigráfico PDVSA.

## 1.5 GEOLOGÍA

### 1.5.1 Geología Regional

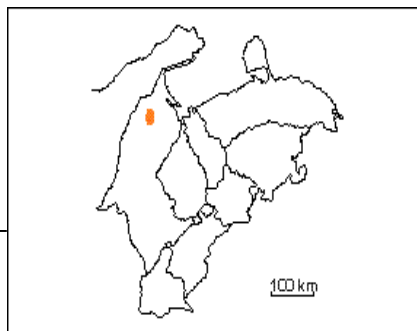
Las formaciones geológicas Guasare, Marcelina y Misoa constituyen las formaciones tipo de la región, en donde se encuentra ubicada la mina Paso Diablo y es el sinclinal de Manuelote en donde se ubican estas tres formaciones, que forman parte de unidades pertenecientes al Paleoceno, siendo la Formación Marcelina la que contiene los carbones que son económicamente explotables y donde se presentan fenómenos de combustión espontánea del carbón.

#### Formación Marcelina.

**Edad: TERCIARIO** (Paleoceno)

Estado Zulia

**Referencia original:** F. A. Sutton, 1946, 1663-1665.



**Consideraciones históricas:** El nombre de Formación Marcelina fue introducido y publicado originalmente por Sutton (1946), para designar la unidad denominada por Garner (1926) Paquete de Carbón de La Rosa. Tal como fue descrita por Sutton, la formación equivale a la parte inferior de la Formación Paso Diablo de Hedberg y Sass (1937). González de Juana (1951) comentó e ilustró esta equivalencia. Aunque el término Paso Diablo tiene prioridad, ha sido poco usado en la literatura geológica, habiéndose generalizado en cambio el de Marcelina. Key (1960) empleó el nombre en el subsuelo del campo Alturitas, Perijá. Miller y San Juan (1963) redefinieron las características de la localidad tipo en el río Guasare, y mencionaron secciones de referencia en los ríos Socuy y Cachirí y en el valle del río Ranchería, en la vertiente colombiana de la sierra de Montes de Oca. En 1982, en las I Jornadas Geológicas de Carbozulia, se presentaron varios trabajos relacionados con la Formación Marcelina, en especial los de Leño (1983) y Ruíz (1983).

**Localidad tipo:** Sutton (*op. cit.*) estableció la localidad tipo de la formación en el río Guasare, desde el tope de una caliza maciza, 550 m aguas arriba de la desembocadura del caño Colorado, hasta la base de una unidad de areniscas gruesas y masivas, a 50 m bajo la boca del caño Santa Rosa, también afluente del Guasare. Las secciones de referencia establecidas por Miller y San Juan (*op. cit.*), están respectivamente en el río Socuy, entre los caños Pedrú y La Arena, al oeste del embalse Socuy y en el río Cachirí, unos 700 m aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Cruz (caño del Norte).

**Descripción litológica:** Sutton (*op. cit.*) describe la litología de la formación como una intercalación de areniscas, lutitas, lutitas arenosas y capas de carbón. En la base de la unidad, las areniscas son macizas, gruesas, de color gris claro y localmente calcáreas. Más arriba se hacen delgadas, están intercaladas con lutitas color gris y presentan planos de estratificación con mica y carbón. Las lutitas son de color gris oscuro a negro, con fractura concoidal o de lápices. Tanto en las areniscas como en las lutitas se encuentran nódulos de arenisca y caliza arenosa de color gris azulado, de forma alargada y midiendo de 1,2 a 2,4 m de largo por 0,6 a 1,2 m de diámetro. El carbón es de tipo subbituminoso a bituminoso, y se presenta principalmente hacia la base de la formación, en capas de 2 hasta 10 m de espesor. En el río Socuy, Miller y San Juan (*op. cit.*) mencionan además, capas de caliza y areniscas calcáreas con restos de moluscos. Las calizas son generalmente delgadas, aunque en la parte inferior de la sección, señalan una capa de 3 m. Ruíz (1983) describe en detalle la litología de la Formación Marcelina a partir de núcleos, en el área tipo, y señala areniscas gris claro a blancuzco, de grano muy fino a medio, subangulares, moderadamente escogidas, con pequeñas cantidades de mica y feldespatos; areniscas limosas gris oscuro, a veces micáceas; conglomerados oligomícticos (-asperonoes) y polimícticos; lodolitos y lutitas gris oscuro a negro, arcilla gris y carbón. Dicho autor indica la existencia de 25 a 30 mantos importantes de carbón, con espesores de 1 a 13 m.

En la Formación Marcelina se observa un conjunto de rocas alteradas por el calor de la oxidación (combustión) de mantos de carbón, las cuales fueron señaladas por Hedberg y Sass (*op. cit.*), González de Juana (*op. cit.*) y Sutton (*op. cit.*). Interpretadas erróneamente como de origen ígneo, fueron estudiadas en forma detallada por Moticska (1977), quien determinó tres tipos principales: porcelanitas producto de limolitas carbonáceas y en parte de areniscas finas, calizas y conglomerados; brechas soldadas y flujos de brechas formados por fragmentos líticos embebidos en roca fundida, y lavas (para-lavas) formadas por la fusión completa del material rocoso. Todas estas variedades presentan diversas tonalidades de rojo, marrón y ocre.

**Espesor:** En la sección tipo, la Formación Marcelina tiene alrededor de 610 m de espesor (Sutton, *op. cit.*). En el río Socuy, el espesor es de unos 550 m (Miller y San Juan, *op. cit.*). Key (*op. cit.*) indica 265 m en el subsuelo del campo Alturitas. Ruíz (*op. cit.*) muestra un espesor de 550 m en sondeos de la mina Paso Diablo, al sur de la localidad tipo. En el campo Alpuf, al noreste de Machiques, Perijá, la formación tiene un espesor promedio de 137 m (Quijada y Caldera, 1985).

**Extensión geográfica:** Los afloramientos de la Formación Marcelina abarcan una faja de unos 54 km de largo, por no más de 4 km de ancho, que va desde unos 3 km al norte del río Guasare, hasta la confluencia del caño Colorado con el río Palma, al sur (Motiscka, *op. cit.*). En el subsuelo, ha sido identificada en los campos de Alturitas (Key, *op. cit.*) y Alpuf (Quijada y Caldera *op. cit.*), en el distrito Perijá. Miller y San Juan (*op. cit.*) señalan su extensión en la vertiente occidental de la sierra de Montes de Oca, en el valle del río Ranchería, Colombia. La formación desaparece hacia el este, en el lago de Maracaibo, por erosión.

**Expresión topográfica:** La Formación Marcelina soporta un relieve de cerros de poca elevación y contornos suaves.

**Contactos:** El contacto de la Formación Marcelina con la Formación Guasare infrayacente, es concordante y transicional. Hacia el sur del macizo de El Totumo, el contacto entre ambas formaciones se hace más difícil de determinar, al ir desapareciendo los rasgos característicos de cada una.

**Edad:** Las evidencias palinológicas (Kuyll *et al.*, 1955, Mederos, 1983) y su posición estratigráfica respecto a la Formación Guasare, dan una edad paleocena para la Formación Marcelina.

**Correlación:** La Formación Marcelina correlaciona, hacia el sur, con la Formación Los Cuervos, del Grupo Orocué. Hacia el oeste, correlaciona estrechamente con la Formación Cerrejón del Paleoceno, en la cuenca de Ranchería, al NE de Colombia (Caceres *et al.*, 1980).

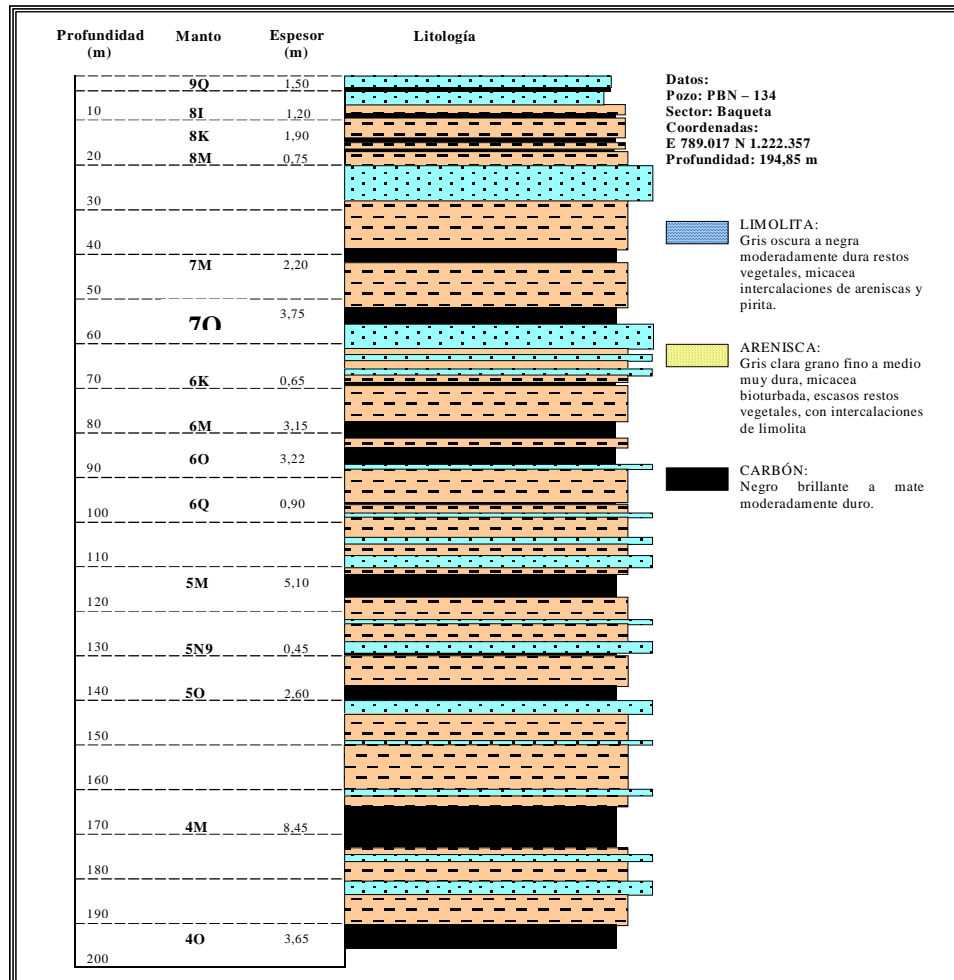
**Paleoambientes:** La Formación Marcelina representa un ambiente sedimentario de tipo paludal, originado por el avance deltáico del Paleoceno, sobre los ambientes de plataforma de la Formación Guasare, Ruíz (1983) al analizar el ambiente de la formación, indica la presencia de ciclotemas incompletos, relacionados con los grupos de carbón identificados en el área de la mina Paso Diablo.

**Importancia económica:** La Formación Marcelina contiene importantes reservas comerciales, de mas de 160 millones de toneladas medidas (Leaño, 1983).

## 1.6 GEOLOGÍA LOCAL

La Formación Marcelina está conformada por 25 a 30 mantos, entre los cuales se distinguen nueve grupos. El *Pit* Baqueta, explotado actualmente, contiene 23 mantos de carbón, del 4O al 11M, ambos inclusive, cuyos espesores suman aproximadamente 35 m y están contenidos en una columna estratigráfica de aproximadamente 200 m (ver anexos A). Los carbones del grupo 9 y superiores

afloran al este de un corredor de falla, fuera del bloque a ser explotado. La figura 2 muestra una columna estratigráfica tipo de la mina Paso Diablo.



**Figura 2. Columna estratigráfica tipo de la Mina Paso Diablo.**  
**Fuente: CDG-SA (2000).**

La información geológica recopilada para el área de Baqueta, proviene de las observaciones de campo realizadas, por el personal de Geología de la operadora minera, en afloramientos, en plataformas, vías y caños, y por perforaciones realizadas. La orientación de las capas de carbón es de N10°E con buzamiento entre 10 y 18° al este. El bloque explotado está delimitado por:

Límite Sur: falla normal de Baqueta, de rumbo Este–Oeste y buzamiento alto al sur (quebrada Baqueta).

Límite Este: está definido por el corredor falla; éste es un sistema formado por dos fallas inversas que atraviesan el depósito de Norte a Sur.

Límite Oeste: determinado por la línea de afloramiento del manto 4O y/o la relación estéril / mena del manto en cuestión (5.5:1).

Límite Norte: definido por los criterios de minería y la continuidad de los mantos.

En mina Paso Diablo existe un sistema de fallas subparalelas de rumbo N 45° O, espaciadas entre 60 y 160 m; en el área de Baqueta el espaciamiento pareciera ser mayor, esto debido no tanto a una simplificación de la tectónica, sino a la poca información que se tiene del área.

## **1.7 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

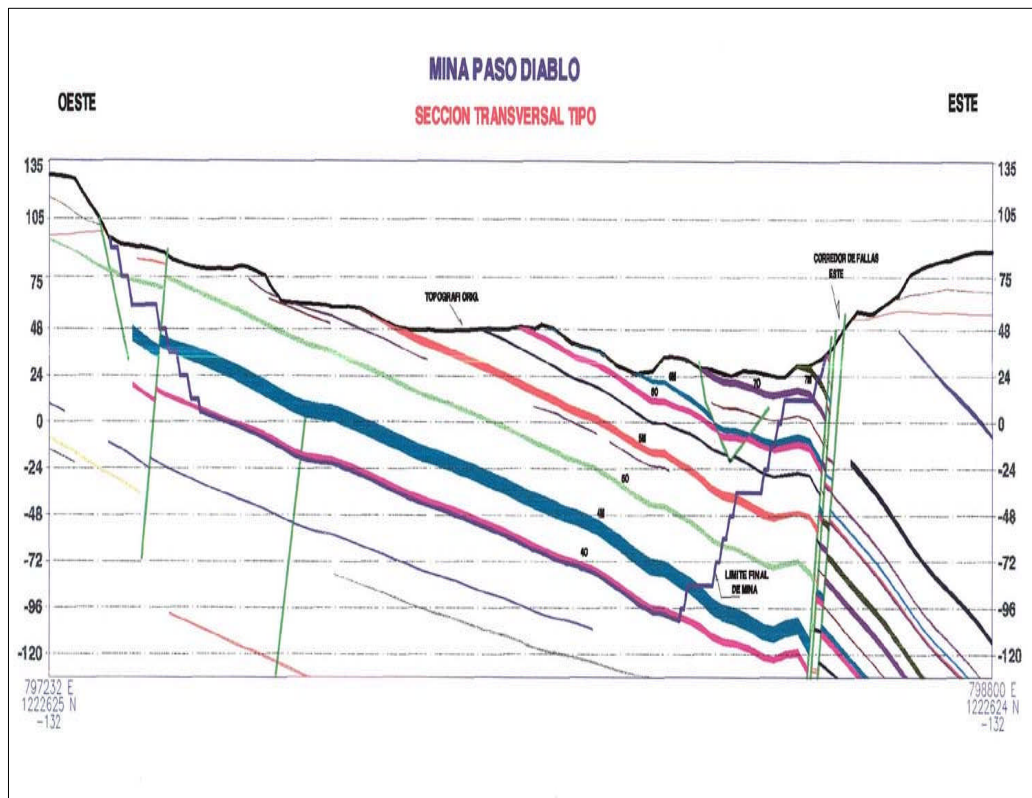
### **1.7.1 Fallas**

Toda el área del *Pit*, se ve limitada por el Este por un sistema de fallas inversas “Corredor de Falla”, de rumbo predominante N–S y de buzamiento 68°W, la falla principal se la denomina COR4 con salto de hasta 50 m.

Específicamente en Baqueta, existen fallas normales e inversas con rumbos N–S y N45W y de buzamiento de 45°E y W, siendo algunas verticales. Estas fallas, reciben denominaciones como: A, D, J, B y O.

En cuanto al área de Transición, existen numerosas fallas inversas de rumbos NE, NW y EW, con buzamientos altos de 75° a 85° mayormente hacia el Sur, con saltos desde 2 m a 52 m, con denominaciones: PCH1, PCH2, PCH3, PCH4, PCH5, a excepción de la Falla *Pork Chop*, la cual además de ser una falla inversa es cabalgante, de buzamiento bajo de 28°, saltos pequeños de 2 a 14 m, localmente de 25 m. Esta falla tiene la particularidad de que su plano de falla asemeja a una “cuchara”, es decir, su superficie de falla forma un sinclinal cuyo eje axial tiene

dirección N35°W con un *plunge* de 14° a 25 ° al SE. La Figura 3 muestra una sección tipo de la Mina Paso Diablo.



**Figura 3. Corte con sección tipo de la Mina Paso Diablo.**  
**Fuente: CDG-SA (2000).**

## 1.8 RECURSOS GEOLÓGICOS

Los recursos geológicos presentes en la cuenca Carbonífera del Guasare representan un total de 6.803 MT, mientras que las reservas están cuantificadas en 1.021 MT. La figura 4 muestra, la cantidad de recursos geológicos de mineral de carbón presentes en Venezuela.



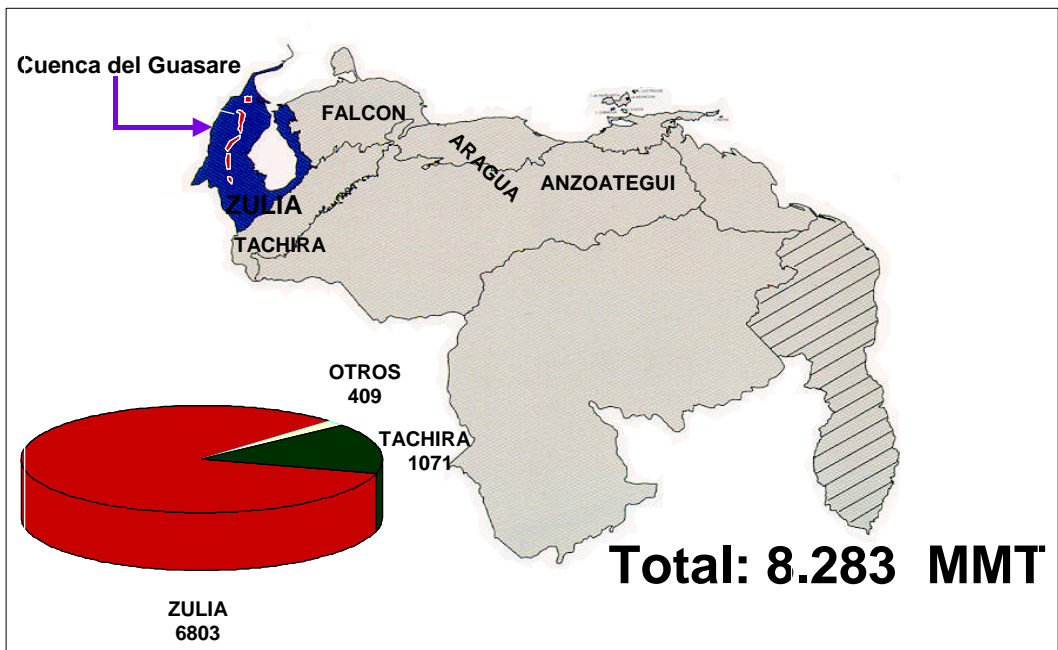


Figura 4. Recursos geológicos de mineral de carbón presentes en Venezuela.

Fuente: CDG-SA (2000).

## **CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DE CARBONES DEL GUASARE S.A.**

Este capítulo trata sobre la empresa CDG-SA, la historia de cómo fue descubierta la cuenca carbonífera, su continuo proceso de explotación desde 1986 en la Mina Paso Diablo y su ubicación y acceso. Por último se habla del método de explotación minero utilizado para extraer el mineral in situ.

### **2.1 RESEÑA HISTÓRICA SOBRE LA CUENCA CARBONÍFERA DEL GUASARE**

Según informes técnicos inéditos en 1830 un grupo de ganaderos del Moján llegó hasta esas montañas; cual sería su sorpresa cuando al borde de una quebrada del río Socuy notaron que el fuego ardía; espantados porque no sabían si eran cosas del diablo o un volcán el que encendía ese fuego, regresaron y contaron lo sucedido. Dicho sitio comenzó a ser llamado por lo indígenas Paso del Diablo, surgiendo así el nombre que hoy damos a la mina.

En 1876 se le atribuye el descubrimiento de la Cuenca del Guasare al general, ingeniero geólogo y geógrafo Wenceslao Briceño Méndez, quien por encargo del gobierno del estado Zulia, descubre los grandes afloramientos de carbón lustroso que existen en el río Guasare; pero no fue hasta 1972 cuando el antiguo Ministerio de Energía y Minas, inicia los estudios geológicos certificando la existencia del carbón con una historia de 30 millones de años y a partir de 1973 otorga a la Corporación para el Desarrollo del Zulia (CORPOZULIA), las concesiones por 70.000 Ha para la exploración de la Cuenca Carbonífera del Guasare (CCG).

En 1976 se crea Carbones del Zulia S.A. (CARBOZULIA), filial de CORPOZULIA y el Fondo de Inversiones de Venezuela (FIV). El 25 de abril de 1986, por decisión del Ejecutivo Nacional, Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) adquiere las acciones que CORPOZULIA y el FIV tenían en CARBOZULIA y se firma el convenio de arrendamiento a PDVSA de las concesiones otorgadas a la

corporación zuliana en 1973, mediante el compromiso del pago de una compensación de 10% del valor de la mercancía puesta a bordo del medio de transporte acordado de las exportaciones de carbón. Se inicia, entre otras actividades, el proceso de licitación para buscar un socio internacional el cual concluyó con la creación de la empresa operadora minera Carbones del Guasare S.A. (CDG-SA), el 2 de agosto de 1988.

CDG-SA se dedicaría a partir de esa fecha a la exploración y explotación del yacimiento “Paso Diablo”, ubicado en la zona del río Guasare, distrito Mara, en el Noroeste del estado Zulia. Estas actividades incluyen minería, transporte y comercialización del carbón extraído en la mina, siendo la producción planteada 1,5 millones de toneladas métricas (MTm), a partir de 1990 CDG-SA da un giro comercial al aumentar su producción hasta 2,5 MTm, momento en el cual se inicia la exoneración del Impuesto Sobre la Renta (ISLR) otorgado por el Ejecutivo Nacional por un período de 5 años.

Tres años más tarde CDG-SA llega a ser una empresa mixta cuyos socios principales son CARBOZULIA, filial de PDVSA en un 49%, la empresa AGIPCOAL de Italia con un 48% y por SOFIMARA del Banco de Maracaibo con un 3%. Para ese año se exportó la cantidad de 5,6 MTm de carbón. Desde 1999 la empresa CDG-SA firma un contrato por 5 años con la empresa Morrison & Knudsen (MK) perteneciente a la empresa Washington Group, radicada en los Estados Unidos, con más de 80 años de experiencia en minería de carbón, implementando mejoras en el proceso, reduciendo los costos operativos y aumentando la eficiencia operacional de la mina.

CDG-SA ha iniciado un proceso de transformación profunda que la llevará a mejorar su eficiencia en las operaciones mineras, tanto en las áreas medulares del negocio (operaciones, transporte, embarque y comercialización) como las unidades asesoras; adoptarán cambios significativos que redundarán en una mejor relación costo de producción / precio del producto.

Se establece así un paso muy importante dentro del proceso de cambio con la contratación de la Gerencia de Operaciones de Mina la cual, luego de un proceso de licitación fue concedida a la empresa norteamericana MK; otorgándole a CDG-SA dirección operacional, conocimientos y procesos tecnológicos que apuntan a obtener rápidamente la competitividad requerida en el difícil mercado internacional del carbón.

## **2.2 UBICACIÓN Y ACCESO A LA MINA**

El Yacimiento Carbonífero del Guasare se encuentra ubicado en el piedemonte oriental de la sierra de Perijá en el sinclinal de Manuelote, en el noroeste del estado Zulia, en el municipio Páez y con coordenadas UTM: N 1.215.000 – 1.225.000 de latitud norte y E 795.000 – 800.000 de longitud oeste (ver Figura 5). La cuenca tiene una extensión aproximada de 50 km de largo, en dirección norte-sur, por unos 3 km de ancho. El poblado más cercano al área de trabajo de la Mina Paso Diablo es Carrasquero, el cual se encuentra a 53 km. Y la mina se encuentra a unos 100 km de la ciudad de Maracaibo.

El acceso a la mina Paso Diablo se realiza mediante las vías asfaltadas de Maracaibo– Carrasquero, Maracaibo– La Mirella, Maracaibo– Campamento General Wenceslao Briceño Méndez, que conducen hasta las instalaciones de la mina aproximadamente a 3 km del caserío La Mirilla; se toma un desvío hacia la derecha que conduce al Centro de Operaciones Mineras de Carbones del Guasare. El acceso hacia el campamento se realiza por vías asfaltadas transitables durante todo el año y para todo tipo de vehículo. En la Figura 6 se muestra un mapa de la ubicación general de la mina Paso Diablo.



Figura 5. Mapa de ubicación relativa de la Cuenca Carbonífera del Gusare.

Fuente: CDG-SA.

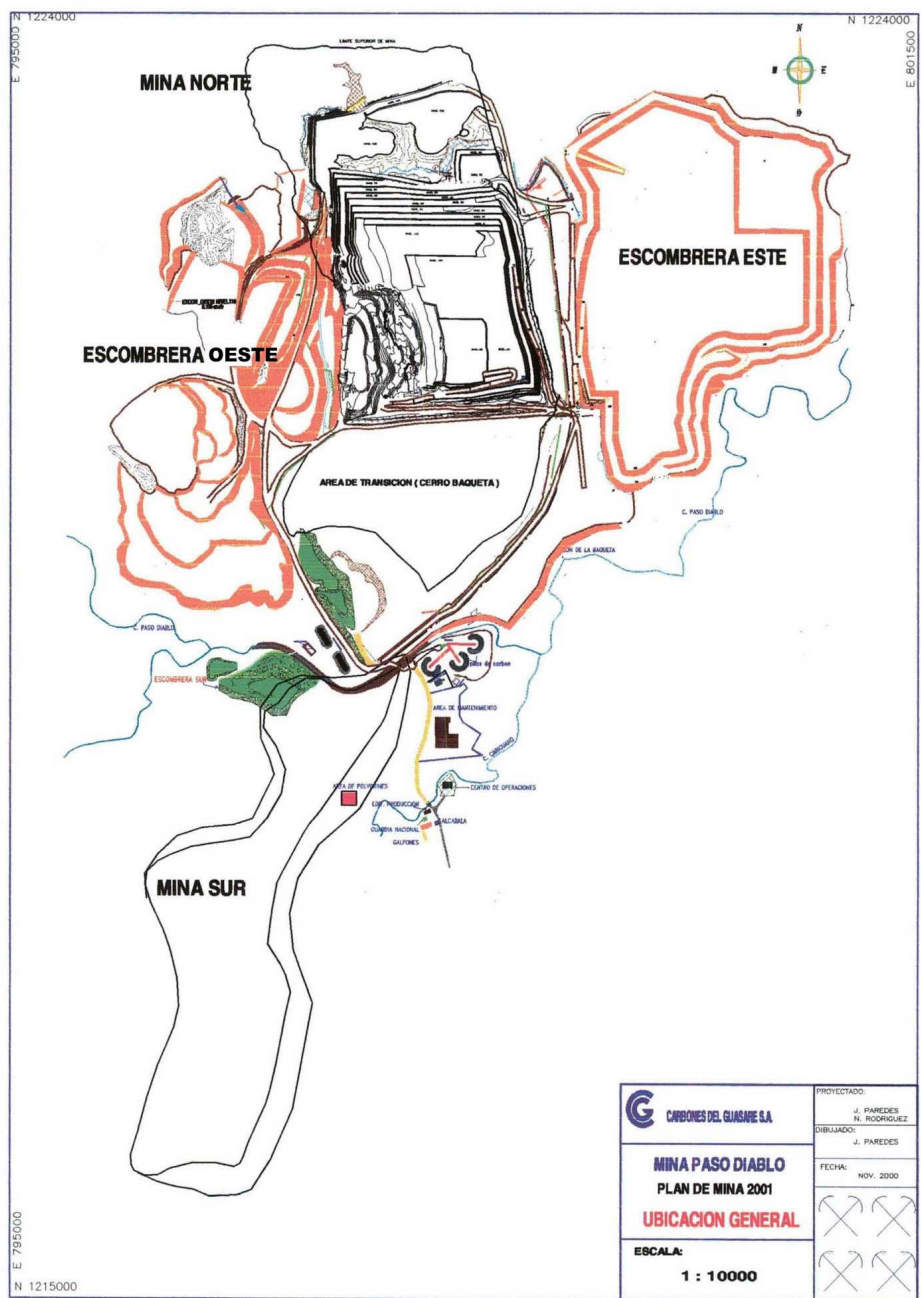


Figura 6. Mapa con la configuración general de la Mina Paso Diablo.

Fuente: CDG-SA.

### 2.3 RESERVAS MINERALES

Las reservas minerales totales en el área Norte del depósito Paso Diablo son 135 MMT. Todo el tonelaje está reportado sobre la base de una densidad relativa estandarizada a 3,5% de humedad natural (Ver Figura 7).

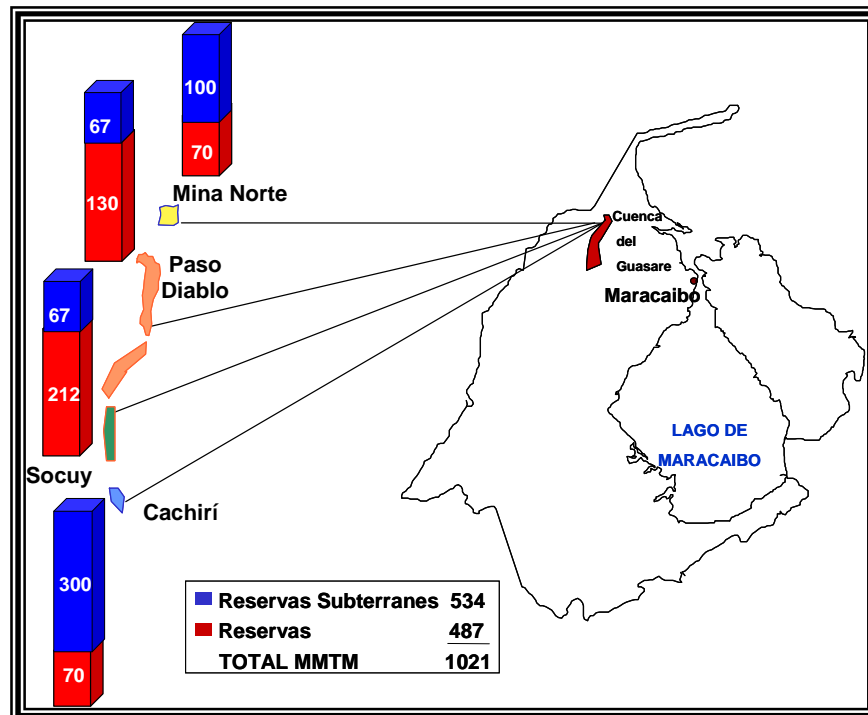


Figura 7. Reservas de mineral de carbón de la Cuenca Carbonífera del Guasare.  
Fuente: CDG-SA (2000).

Las reservas son evaluadas con el programa de computación Minescape® de Mincom®, basados en el modelo geológico revisado y actualizado por el personal de las empresas Washington Group y CDG-SA. Para calcular las reservas se consideran 23 mantos de carbón pertenecientes a la Formación Marcelina y debido a la compra de maquinaria especializada se pueden excavar mantos que tengan un espesor mínimo de 50 cm.

El método de evaluación se basa en los cálculos de reservas minerales por bloques de explotación para cada nivel de trabajo. Cada bloque está limitado por dimensiones específicas que oscilan entre 200 y 250 m de ancho y alturas variables entre 4 m como mínimo y un máximo de 15 m, la extensión lateral del bloque viene dado por la intersección de las trazas de los mantos en cada nivel evaluado. Esta metodología permite tener una información más clara sobre el material contenido en cada bloque con una mejor definición de la geometría existente, lo que permite la elaboración de una secuencia de explotación considerando asignaciones óptimas de las diferentes unidades de carga en los posibles frentes.

Las reservas minerales totales en el área norte del depósito Paso Diablo son de 135 MT a una humedad de 3,5%. Todo el tonelaje está reportado sobre la base de una densidad relativa estandarizada a 3,5% de humedad. Existe una pequeña diferencia de 0,06% entre las reservas reportadas por el modelo geológico y las reportadas por la data de minería, esto es debido al tipo de interpolador usado en cada caso. La comparación de las reservas es la siguiente:

Modelo Geológico: 130 MT (a 3,5% Humedad).

Data de Minería: 130,078 MT (a 3,5% Humedad).

Las reservas y sus calidades asociadas por manto se presentan en la Tabla 1. Las reservas han sido divididas en cuatro bloques principales con el propósito de hacer un análisis rápido. Estas cuatro áreas son:

1. Baqueta– la fosa actual hasta la pared final alta.
2. Baqueta Norte– el área inmediatamente al Norte de la actual mina Baqueta, la cual ha sido previamente desarrollada en 1999.
3. Cerro Baqueta (*Pork Chop Hill*) – el área entre la actual mina Baqueta y la anterior mina Paso diablo.
4. Área Norte – el área al extremo Norte de las reservas carboníferas, al Norte de Baqueta Norte y limitada por el banqueo de mina.



Tabla 1. Calidades por manto de carbón.

MANTO	GRAVEDAD ESPECIFICA (ton/mcb)	PODER CALORIFICO (kcal/kg)	PODER CALORIFICO (BTU/lb)	CENIZAS %	HUMEDAD INHERENTE %	AZUFRE %	MAT. VOL. %	CARBONO FIJO %
4O	1.26	8068	14537	3.00	1.80	0.64	35.50	59.70
4M	1.26	8102	14598	3.03	1.97	0.52	35.55	59.45
4M1	1.27	7836	14119	4.44	2.55	0.73	35.85	57.16
4M2	1.27	7659	13800	5.35	2.32	0.88	35.96	56.37
5O	1.29	7997	14409	6.02	2.25	0.56	34.94	56.79
5Q	1.26	7600	13694	7.00	3.00	0.60	34.90	55.10
5M	1.27	8006	14425	4.80	2.35	0.80	35.51	57.34
5M1	1.28	7834	14115	5.80	2.16	1.01	35.87	56.17
5M2	1.00	7868	14177	8.32	2.22	1.12	34.79	54.67
5N5	1.31	7773	14005	5.72	2.31	0.88	34.52	57.45
5N7	1.31	7859	14160	9.76	2.97	0.80	35.55	51.72
5N9	1.33	7088	12771	12.41	2.92	0.92	34.75	49.92
6K	1.29	7324	13196	8.96	3.11	1.86	35.10	52.83
6O	1.32	7882	14202	7.81	2.25	0.82	35.00	54.94
6M	1.28	7959	14341	4.73	2.34	0.85	35.86	57.07
6MO	1.29	7812	14076	5.87	2.14	0.80	34.93	57.06
6Q	1.36	6987	12589	16.81	2.65	0.93	29.95	50.59
7O	1.27	7967	14355	3.45	2.39	0.59	36.83	57.33
7M	1.28	7951	14326	3.88	3.27	0.74	34.54	58.31
7M2	1.28	7592	13679	6.10	3.02	0.96	35.10	55.78
8M	1.31	7331	13209	11.13	2.77	0.86	35.58	50.52
8K	1.31	7608	13708	9.25	3.18	0.90	35.77	51.80
8KM	1.28	7998	14411	5.79	2.75	0.97	36.44	55.02
8I	1.30	7791	14038	8.67	2.63	0.86	34.26	54.44
9Q	1.31	7682	13841	9.16	2.16	1.68	32.91	55.77
9O	1.31	7454	13431	10.97	2.08	0.68	33.93	53.02
9K	1.25	7950	14324	1.75	5.78	0.33	32.33	60.14
9G	1.26	7698	13870	3.30	5.05	0.33	33.95	57.70
10M	1.28	7499	13512	5.54	4.57	0.56	32.85	57.04
11M	1.26	7687	13850	3.46	6.01	0.37	31.75	58.78
<b>Promedio</b>	<b>1.28</b>	<b>7728.73</b>	<b>13926</b>	<b>6.74</b>	<b>2.90</b>	<b>0.82</b>	<b>34.69</b>	<b>55.67</b>

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.1 Reservas Minerales Tipo *Run of Mine* (ROM)

#### Pérdida y Dilución

La pérdida, dilución y recuperación de carbón planificadas han sido desarrolladas sobre una base de manto por manto, tomando en consideración las experiencias locales con relación a: espesor del manto, tipo de estéril en contacto con el carbón y la ubicación del manto en la secuencia de minería. Se asume que existirá un constante mejoramiento en la recuperación del carbón basado en una práctica mejorada de minería con el nuevo tractor D9 y estándares de minería más altos que los actuales. Los factores de recuperación de los mantos 5M, 8K, 8I, 9Q han sido aumentados de 85% a 90%. Los parámetros utilizados para determinar las reservas ROM se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores de Recuperación de Carbón, Pérdida y Dilución por Manto (ROM).

Manto	Dilución (cm)	Pérdida l (cm)	Recuperación de Carbón (Porcentaje) 2000
4O	10	10	95
4M	10	10	97
5O	10	10	95
5M	10	10	90
6O	10	10	90
6M	10	10	90
6MO	10	10	95
7O	10	10	95
7M	5	15	90
8M	5	15	90
8K	5	15	90
8I	5	15	90
9Q	5	15	90
0,5- 1 m	10	10	85

Fuente: Elaboración Propia.

Para el área de Cerro Baqueta se ha agregado una pérdida de carbón global adicional de 5% debido a la dificultad que representa la presencia de pequeños y

grandes desplazamientos existentes en las fallas. Durante la explotación de la fosa Paso Diablo hubo algunas pérdidas de carbón como consecuencia del gran número de pequeñas fallas que allí se encontraban, se considera que en Cerro Baqueta las fallas existentes dificulten en gran grado el proceso de minería y que igualmente se produzcan pérdidas de carbón.

El espesor del material de la dilución se ha establecido en 10 cm como una regla general, excepto para los mantos 7M al 9Q inclusive, donde se ha usado 5 cm. Estos mantos frecuentemente tienen una calidad más baja por lo que se ha establecido que su pérdida total sea de 15 cm a fin de restringir la dilución a 5 cm. En general las pérdidas de carbón en las interfases han sido establecidas en 10cm. Las calidades de dilución utilizadas se muestran en la Tabla 3. La densidad esta dada a una humedad de 3,5 % después de secado al aire.

**Tabla 3. Calidad de Dilución Asumida.**

<b>Parámetros de Dilución</b>	<b>Calidad</b>
Densidad	2,26
Ceniza %	78,2
Poder Calorico kcl/kg.	1009
Azufre %	1,8

**Fuente: Elaboración Propia.**

### **Recuperación de Carbón**

En las reservas del modelo minero se han incorporado carbones de hasta 0,5m de espesor. Esto le ha sumado unas reservas extras in situ de 6,5 MT a las reservas de las áreas de la fosa Norte. Sin embargo, algunos de estos carbones delgados son de pobre calidad y en ocasiones su presencia es esporádica a lo largo del depósito. En el transcurso de la secuencia se tiene la opción de acomodar algo de este carbón como estéril dependiendo de la especificación global de calidad para el periodo mensual.

La eficiente recuperación del carbón es de suma importancia para poder maximizar las reservas y mantener los requerimientos de remoción de estéril al mínimo. La extracción de carbón debe realizarse hasta un nivel de espesor tan

delgado como sea práctico, teniendo en consideración las condiciones locales y el uso eficiente de los equipos modernos de minería. En las operaciones de minería a nivel mundial usualmente se extraen espesores de 15 a 30 cm. Sin embargo como en Paso Diablo el carbón es un producto no lavado, los mantos muy delgados pueden llegar a tener relativamente una gran cantidad de dilución y llegar a ser no económicos para la mina. Existe muy poco tonelaje de carbón por debajo de los 0,5 m de espesor, de allí que 0,5m fue seleccionado como el nivel mínimo de espesor para ser minado.

## 2.4 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

En la mina Paso Diablo se realiza la explotación del carbón mediante el sistema de minería a Cielo Abierto. El *Pit* o Tajo que actualmente se encuentra en explotación es denominado Baqueta. Existe una serie de parámetros de diseño del *Pit* que han sido preestablecidos y se mencionan a continuación:

- **Altura de Banco:** si se trabaja en niveles superiores a los 60 msnm, los bancos se excavan con una altura de 15 m, por debajo del nivel 60 los bancos se excavan con una altura de 12 m. Esta convención se implantó en 1998 debido a que un estudio de investigación determinó que la altura de 12 m para los bancos mejoraba el rendimiento de las palas hidráulicas y reducía en un 20 % la distancia de empuje de los tractores.
- Actualmente en la mina Paso Diablo se trabaja con paneles de 120 m de ancho, iniciándose desde la pared Sur del *Pit* Baqueta hasta la zona Norte del mismo *Pit*. Los paneles están contenidos en tres áreas importantes denominadas: Baqueta Sur (coordenadas UTM: N1.221.120 a N1.221.960), Baqueta Centro (coordenadas UTM: N1.221.960 a N1.222.800) y Baqueta Norte (coordenadas UTM: N1.222.800 a N1.223.640, actualmente ésta no se encuentra en explotación). Las áreas están delimitadas en sus coordenadas Este desde E 797.000 a E 799.000. En la Figura 8 se observan los paneles de

trabajo. Estas áreas de trabajo contienen siete (7) paneles, lo cual le da un ancho de 840 m a cada área.

- Ángulos de excavación en taludes: pared de avance Este y Norte 12 grados; pared Oeste (*low wall*) 30 grados, pared Sur 35 grados, pared final (*high wall*) 34 grados.
- Ángulo general de escombreras externas: 17 grados.
- Ángulo general de escombreras internas: 24 grados.
- Altura de terrazas de escombreras: 20 metros.
- Ancho de terrazas de escombreras: 40 metros.
- Pendiente de piso en terrazas y bancos (pie a cresta): 2%.
- Gradiente de rampas: 8%.
- Ancho de mínimo de vías: 27 m.
- Ángulo del frente del banco: 2:1.
- Talud de avance paralelo al rumbo: 10 grados.
- Talud de trabajo perpendicular al rumbo: 12 grados.
- Esponjamiento de escombreras: 40%.

Las excavaciones se realizan a favor de la dirección del buzamiento de los planos de estratificación, de esta forma se puede garantizar más estabilidad del frente en el cual se trabaje. La relación de remoción o relación Estéril–Mena es de 5,5:1, es decir, 5,5 metros cúbicos banco (mcb) de estéril por tonelada de carbón. La secuencia de explotación de los bloques es de la pared alta hacia la pared baja (desde el este hacia el oeste). La producción de carbón para el año 2001 se estableció en 6.800.000 t/año y 37.413.000 metros cúbicos bancos (mcb) de estéril.

El perfil de acarreo para el año 2001 se estimó en 3200 m aproximadamente, distribuidos así: 1.614 m en ascenso, 1.386 m en plano y 200 m bajando, con una velocidad promedio de acarreo de 19 kilómetros por hora (kph) y retorno de 42 kph, con una resistencia al rodamiento de 3%, lo cual implica un mantenimiento aproximado de 86.400 m<sup>2</sup>, sin considerar vías perimetrales y de servicio.

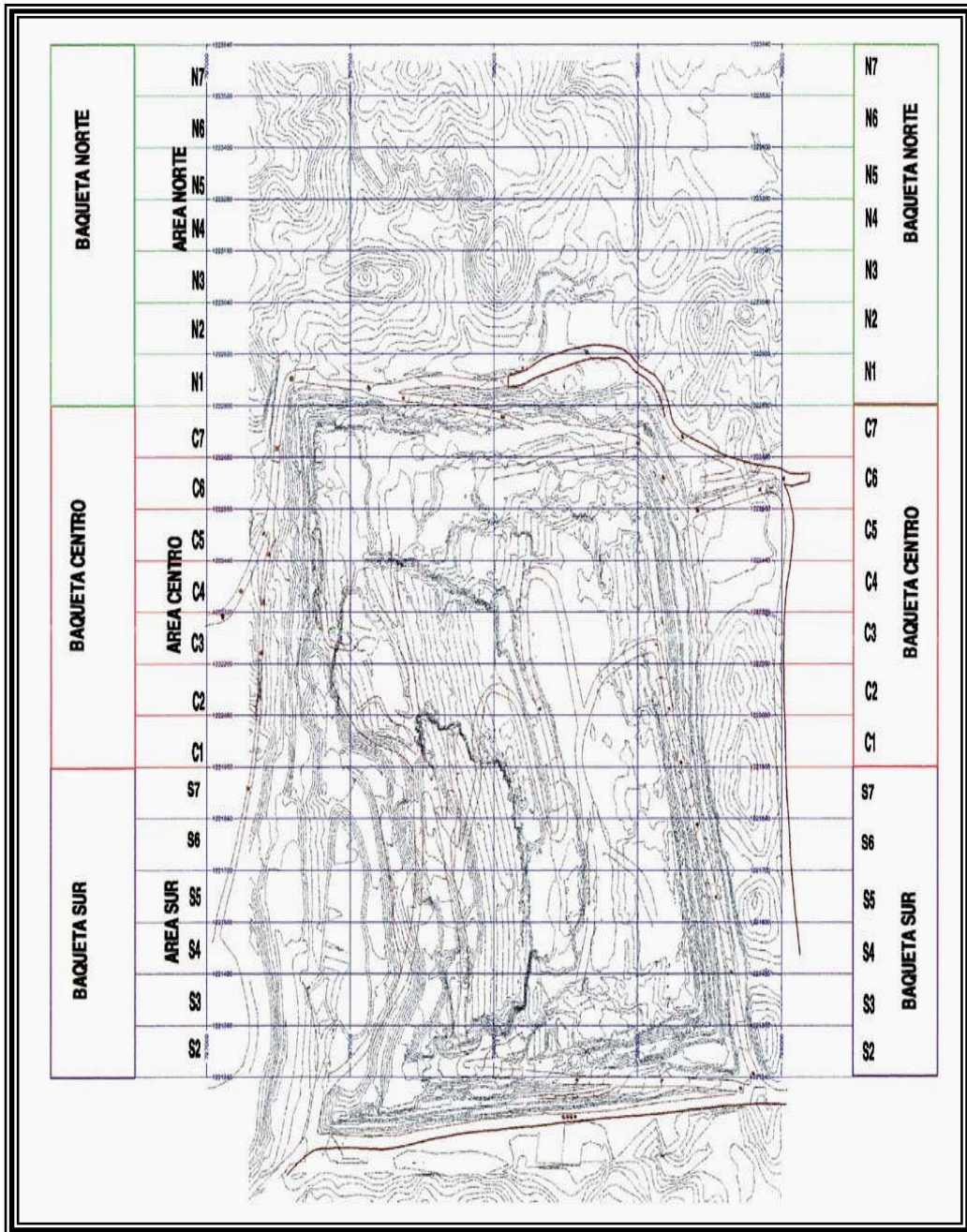


Figura 8. Paneles de trabajo empleados en la planificación de la mina Paso Diablo.

Fuente: CDG-SA (2000).

#### 2.4.1 Flota de Equipos Mineros.

Para la ejecución de la explotación del carbón la mina cuenta con una flota de equipos de alta envergadura, con la cual se distribuyen las operaciones mineras para poder lograr extraer el carbón de la forma más eficiente, económica y segura posible, sin descuidar la protección ambiental. A continuación se muestra una serie de tablas (4-11) donde se enumera cada una de las flotas con las que cuenta la operadora minera y sus características más resaltantes.

**Tabla 4. Equipos de acarreo.**

Cantidad	Marca	Modelo	Capacidad Tolva
30	Camión Roquero Caterpillar®	CAT-789B	177 ton
6	Camión Roquero Caterpillar® (Carboneros)	CAT-789B	170 ton
4	Camión Roquero Caterpillar®	CAT-793C	236 ton

**Tabla 5. Flota de palas.**

Cantidad	Marca	Modelo	Capacidad de Cucharón
2	Pala Eléctrica P&H *®	XPA-2800	36 m <sup>3</sup>
2	Pala Hidráulica O&K®	RH 200	23 m <sup>3</sup>
2	Pala Hidráulica Retro O&K®	RH 200	23 m <sup>3</sup>

(\* Solo para remoción de estéril)

**Tabla 6. Flota de perforadoras.**

Cantidad	Marca	Modelo	Diámetro
1	Drilltech®	D25K	6 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
3	Drilltech®	D75K	9 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> "
1	Ingersoll – Rand®	DML 1900 XL	9 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> "

**Tabla 7. Flota de cargadores.**

<b>Cantidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad de Cucharón</b>
2	Cargador Frontal Caterpillar®	CAT-992C	12 m <sup>3</sup>
5	Cargador Frontal Caterpillar®	CAT-994D	(2)30 m <sup>3</sup> (1)16m <sup>3</sup>
2	Cargador Frontal Caterpillar®	CAT-966F	5 m <sup>3</sup>
3	Cargador Frontal Caterpillar®	CAT-988F	6,1 m <sup>3</sup>

**Tabla 8. Flota de tractores de orugas.**

<b>Cantidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
3	Tractor de Orugas Caterpillar®	D9R
6	Tractor de Orugas Caterpillar®	D10N
2	Tractor de Orugas Caterpillar®	D11N
6	Tractor de Orugas Caterpillar®	D11R

**Tabla 9. Flota de motoniveladoras.**

<b>Cantidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
5	Motoniveladora Caterpillar®	CAT-16G
1	Motoniveladora Caterpillar®	CAT-16H

**Tabla 10. Flota de equipos de riego.**

<b>Cantidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
3	Ballena Equipo de Riego	CAT-773B
2	Ballena Equipo de Riego	CAT-777D

**Tabla 11. Flota de Tractores de Ruedas (TIGER).**

<b>Cantidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
1	Tractor de Ruedas Caterpillar®	CAT-824C
4	Tractor de Ruedas Caterpillar®	CAT-992



#### **2.4.2 Operaciones Básicas de Minería.**

Como se esquematiza en la Figura 9 dentro de las actividades mineras que se realizan en la mina Paso Diablo hay que destacar las siguientes: remoción de la capa vegetal, perforación y voladura del estéril, transporte del estéril, extracción del carbón, trituración del carbón.

Las operaciones de mina que se realizan en CDG-SA comienzan con la solicitud del permiso al Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), para ser autorizados a deforestar el área que se desea explotar. Una vez que se obtiene el permiso se procede al corte y almacenamiento de los árboles que son inventariados (Inventario que es obligatorio dada las normativas que establece el MARNR) por el departamento de Ambiente. La deforestación se completa con la remoción de la capa vegetal que recubre la superficie en donde se ubica el manto de carbón a extraer. La misma es realizada con maquinaria de la operadora minera, la cual generalmente está constituida por tractores (*bulldozer*), ya sea el D9R, D10N, o D11R y la utilización de uno con respecto al otro, es directamente proporcional al tamaño de la vegetación que se desea retirar. Después de realizada la deforestación de la capa vegetal, la misma es transportada a las escombreras de capa vegetal o directamente a los lugares designados para la recuperación ambiental.

El siguiente paso después de realizada la deforestación, es proceder a la extracción del carbón, para lo cual es necesario remover el estéril que recubre el manto de carbón. Esta remoción se elabora por el método convencional de arranque mineral, es decir, por Perforación y Voladura. Para la ejecución de la perforación, en la mina se cuenta con perforadoras rotativas, que utilizan brocas de triconos de diámetro  $9\frac{7}{8}$  de pulgada (251 mm). La carga de explosivos en los barrenos se realiza mediante camiones mezcladores de explosivos. Entre las mezclas realizadas por estos camiones conseguimos ANFO (Nitrato de Amonio (AN) y Fuel Oil (FO), usado en barrenos que no contengan agua), Emulsion (Dispersiones de Soluciones oxidantes de agua en un aceite medio o emulsiones de “agua en aceite”, usada en barrenos con

agua), y Super Anfo (“Heavy Anfo”, mezcla de Anfo y Emulsión, usado en barrenos con agua).

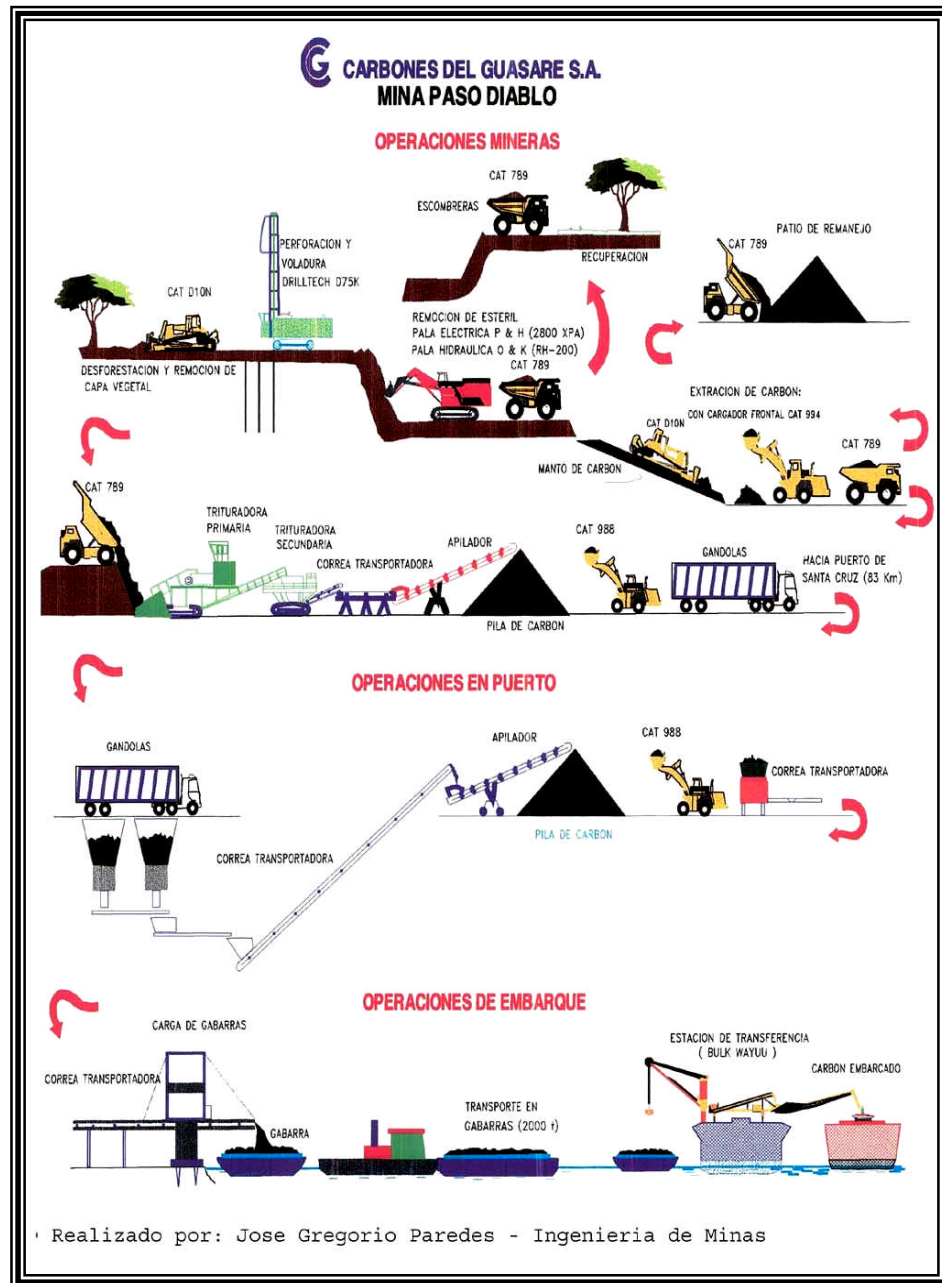


Figura 9. Diagrama de operaciones básicas de la mina Paso Diablo.

Fuente: CDG-SA.

Una vez que se ha efectuado la voladura del estéril se procede a la carga y transporte del mismo. Para realizar la carga del estéril en la mina se cuenta con un grupo de palas eléctricas P&H® e hidráulicas O&K®. Para el transporte del estéril se cuenta con una flota de camiones roqueros, los cuales son dirigidos hacia las escombreras en donde es dispuesto el material volado.

En cuanto al manto de carbón que es destapado, los tractores (*bulldozer*) se ocupan del escarificado y apilamiento del mismo, para que posteriormente los cargadores frontales (Caterpillar® 994) se encarguen de colmatar los camiones roqueros (estos camiones son llamados “carboneros” debido a que se les modificó la tolva de manera tal que pudieran aumentar la capacidad de transporte). Dichos camiones roqueros transportan el carbón al área de trituración o al patio de remanejo, en donde se almacena el carbón dependiendo de su calidad, mientras que el carbón que es transportado al área de trituración (ubicada a 2 km aproximadamente del *Pit*) es sometido a un proceso de reducción de tamaño (un mínimo de 2”) y almacenado por un grupo de apiladores que se encargan de separar el carbón dependiendo de la calidad del mismo.

El área de apilamiento, en el área de trituración, tiene capacidad para almacenar 180.000 ton de carbón triturado en tres pilas de forma circular de 60.000 ton cada una. La pendiente natural mínima del terreno es de 1 % y la máxima de 1,6 %, las cuales se consideran suficientes para permitir el drenaje adecuado de las aguas de lluvia. Sobre el terreno natural se extendió y compactó una capa de carbón de aproximadamente 40 cm de espesor para mejorar la superficie de circulación de vehículos y maquinarias y evitar la contaminación del carbón depositado en las pilas. Las vías o áreas de circulación fueron diseñadas en función de la maniobra de gandolas tipo 3S-3 con un ancho mínimo de 15 m. Entre las pilas se consideró una separación mínima de 20 m libres, a máxima capacidad, para permitir la maniobra de la gandolas. Existen dos trituradoras, la 4005 (3000 ton por hora) y la 4002 (1200 ton por hora) siendo ambas trituradoras primarias. Éstas están conformadas por un molino de dientes. Las trituradoras secundarias son molinos de rodillos que tienen

una abertura aproximada de 2” el cual es el tamaño en que generalmente se comercializa el carbón. En cuanto a la operación de los apiladores, la misma está prevista para apilar en forma alterna, de forma que no funcionará más de un apilador a un mismo tiempo.

Una vez que el carbón es almacenado y separado por calidades dentro del área de trituración, se procede a transportar el carbón al puerto de embarque ubicado en Santa Cruz de Mara (distanciado a 83 km de la mina), dicho traslado se realiza por medio de gandalas de 45 Tm de capacidad, cuyo sistema de volqueo es lateral. Estas gandalas antes de ser trasladadas al puerto de embarque, deben ser sometidas a dos procesos muy importantes como son: el Enrasado, el Enlonado y el Pesaje de las Gandolas.

El Enrasado consiste en llevar al ras el carbón en la tolva de la gandola y se realiza por medio de la utilización de una pala, limpiando los bordes y centro de las bateas hasta unos 80 cm para evitar derrames en las vías y accidentes a vehículos y personas. El Enlonado se realiza después del Enrasado y se basa en la colocación de una lona hasta la parte posterior de la batea de la gandola, luego hacia los lados previendo que los mecates queden hacia fuera y luego se amarran fuertemente para evitar que caigan trozos de carbón en las vías. El pesaje de las gandalas se efectúa a la salida del enlonado en su recorrido hacia la alcabala de Carichuano. Se emplean dos (2) balanzas tipo AMD Colónico® con capacidad de 100 ton y apreciación de 200 Kg., se emplea una de las balanzas para tara (gandalas vacías), y otra para el peso bruto (gandalas cargadas) aunque se pueden emplear independientemente en el caso de mantenimiento de una de ellas.

Luego que el carbón es transportado al puerto de embarque, éste es almacenado nuevamente por apiladores con la finalidad de revisar las calidades que el comprador ha especificado (humedad, poder calorífico, porcentaje de azufre, porcentaje de cenizas, etc.). Como paso siguiente, el carbón es trasladado a gabarras de 2.000 ton de capacidad por medio de cintas transportadoras. Estas gabarras son remolcadas posteriormente hasta donde se encuentra ubicada la estación de

transferencia Bulkwayuu, cuya función es transferir el carbón de las gabarras a los buques de mayor calado para transporte marítimo. Dichos buques son aquellos que el comprador ha contratado para que se encarguen de transportar el carbón al mercado internacional.

## **CAPÍTULO III. CONSIDERACIONES DEL CARBÓN**

En este capítulo se ofrecen definiciones y descripciones de todas aquellas palabras claves que entran en el ámbito del estudio. Es una investigación de conceptos básicos para ayudar a entender el proceso de la combustión espontánea del carbón y avanzar en la búsqueda de resultados efectivos en el diagnóstico del problema y en su posible mitigación o prevención.

### **3.1 CARBÓN**

El carbón es un combustible sólido de origen vegetal. Los diferentes tipos de carbón se clasifican según su contenido de carbono fijo. La turba, la primera etapa en la formación de carbón, tiene un bajo contenido de carbono fijo y un alto índice de humedad. El lignito, el carbón de peor calidad, tiene un contenido de carbono mayor. La antracita es el carbón con el mayor contenido en carbono y el máximo poder calorífico. La presión y el calor adicionales pueden transformar el carbón en grafito, que es prácticamente carbono puro (López, 1989).

Ciertos productos de la combustión del carbón pueden tener efectos perjudiciales sobre el ambiente. Al quemar carbón se produce dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre otros compuestos. Muchos científicos creen que, debido al uso extendido del carbón y otros combustibles fósiles (como el petróleo), la cantidad de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera terrestre podría aumentar hasta el punto de provocar cambios en el clima de la Tierra (Efecto Invernadero). Por otra parte, el azufre y el nitrógeno en el carbón forman óxidos durante la combustión que pueden contribuir a la formación de lluvia ácida (Cliff, 1992).

Todos los tipos de carbón tienen alguna utilidad. La turba se utiliza desde hace siglos como combustible para fuegos abiertos, y más recientemente se han fabricado briquetas de turba y lignito para quemarlas en hornos. La siderurgia emplea carbón metalúrgico o coque, un combustible destilado que es casi carbono puro. El proceso

de producción de coque proporciona muchos productos químicos secundarios, como el alquitrán de hulla, que se emplea para fabricar otros productos.

### **3.1.1 Características y Propiedades del Carbón.**

El carbón tiene su origen en restos vegetales depositados hace millones de años. Gracias a los movimientos tectónicos de la corteza terrestre y a las altas presiones y temperaturas alcanzadas, estos restos vegetales sufren transformaciones físicas y químicas que, con el transcurso del tiempo, forman al carbón como se le conoce.

Uno de los principales componentes que resta valor al carbón y que obliga a su posterior tratamiento, lo constituye el contenido de cenizas. La ceniza es el material inorgánico e inerte que acompaña al carbón, su presencia por tanto, rebaja el poder calorífico y afecta el funcionamiento de los hornos. Otros elementos del carbón son: el oxígeno, nitrógeno, azufre y gases. Aunque cada elemento afecta en distintas formas las características del carbón, en la práctica el elemento más importante a controlar es el contenido de azufre. Cuando se quema carbón, las emisiones de azufre corroen los tubos de las calderas y eventualmente escapan al ambiente. Por este motivo, la normativa ambiental y en definitiva los clientes, controlan constantemente los porcentajes de azufre contenidos en el carbón.

Las propiedades más importantes del carbón son su poder calorífico, es decir, la cantidad de calor que se libera en combustión completa por cada unidad de material quemado; la humedad libre e inherente, que afecta directamente los rendimientos de la combustión; y el hinchamiento, particularmente relevante en la coquización (Enciclopedia Microsoft Encarta, 1999).

### **3.1.2 Clasificación del Carbón.**

Las variaciones en la edad y en la historia geológica del carbón ocasionan variaciones en el rango. La clasificación general y básica del carbón es por rango o

categoría, desde turba y lignitos en el extremo inferior de la escala, pasando por los carbones bituminosos hasta llegar a la antracita en el extremo superior. Por lo general, cuanto más alto sea el rango del carbón, mayor será su edad, contenido de carbono y poder calorífico, de igual modo, más bajo será su contenido de hidrógeno y materias volátiles.

Los distintos sistemas de clasificación de carbón se basan en distintas propiedades, que en esencia buscan determinar el poder calorífico del carbón. De esta forma es posible construir un rango de clasificación que permite identificar la génesis, edad, tipo de biomasa originaria, condiciones bioquímicas y fisicoquímicas que caracterizan el desarrollo del carbón (Ver figura 10).

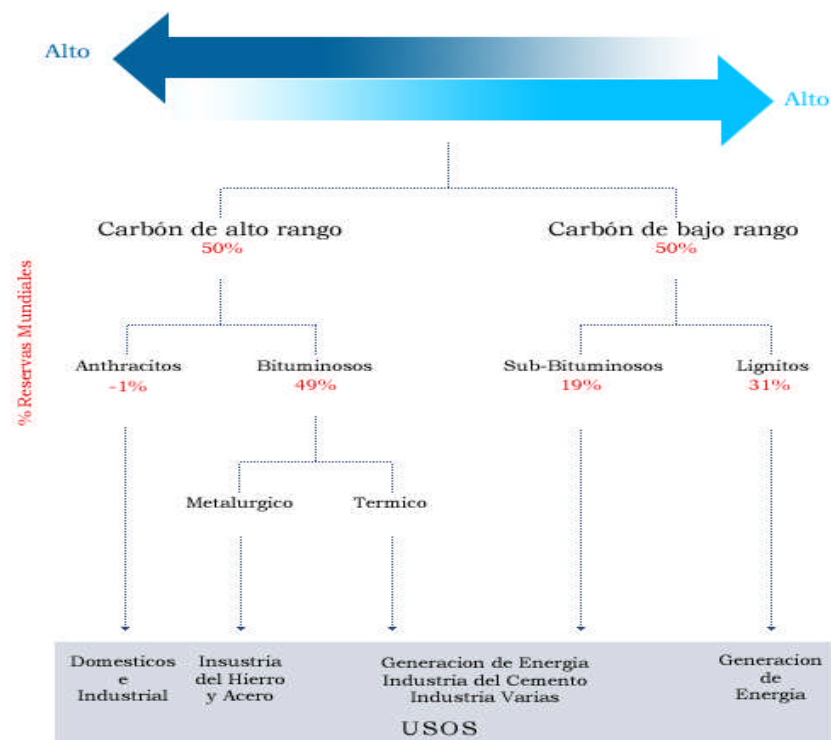


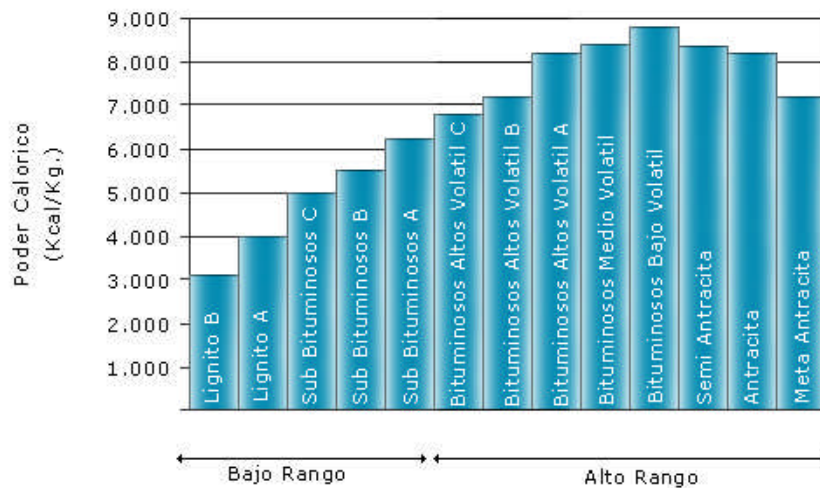
Figura 10. Diagrama con los usos del carbón mineral.

Fuente: Normas ASTM, (2003)



### 3.1.3 Normas *American Society for Testing and Material* (ASTM) de Clasificación de Carbones

Las normas ASTM fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg. En éste rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg., se incluyen los carbones bituminosos y antracitas (Ver figura 11)



**Figura 11. Clasificación del Carbón según su Poder Calorífico.**

**Fuente: Normas ASTM, (2003).**

## 3.2 COMBUSTION DEL CARBÓN

La combustión es una reacción de oxidación entre un combustible y un comburente, iniciada por una cierta energía de activación y con desprendimiento de calor (reacción exotérmica). El proceso de combustión transcurre esencialmente en fase de vapor. Los sólidos se someten primero a un proceso de descomposición de su

estructura molecular, a elevada temperatura, hasta llegar a la formación de gases que pueden ser oxidados. Los líquidos primero se vaporizan, luego se mezclan con el comburente y se someten a la acción de la llama para iniciar la reacción (Banerjee, 1985).

### 3.2.1 Tipos de Combustión del Carbón

En función de la velocidad en la que se desarrolla la combustión del carbón, se clasifican en:

**Combustiones lentas:** Se producen sin emisión de luz y con poca emisión de calor. Se dan en lugares con escasez de aire en combustibles muy compactos o cuando la generación de humos enrarece la atmósfera, como ocurre en sótanos y habitaciones cerradas. Son muy peligrosas, ya que en el caso de que entre aire fresco puede generarse una súbita aceleración del incendio, e incluso una explosión.

**Combustiones rápidas:** Son las que se producen con fuerte emisión de luz y calor, con llamas. Cuando las combustiones son muy rápidas, o instantáneas, se producen las explosiones. Las atmósferas de polvo combustible en suspensión son potencialmente explosivas. Cuando la velocidad de propagación del frente en llamas es menor que la velocidad del sonido (340 m/s), a la explosión se le llama deflagración. Cuando la velocidad de propagación del frente de llamas es mayor que la velocidad del sonido, a la explosión se le llama detonación (Enciclopedia Microsoft Encarta, 1999).

### 3.2.2 Resultados de la Combustión del Carbón

Los resultados de la combustión son humo, llama, calor y gases:

**Humo:** Aparece por una combustión incompleta, en la que pequeñas partículas se hacen visibles, pudiendo impedir el paso de la luz. El humo puede ser también inflamable, cuando la proporción de oxígeno y calor es la adecuada. Es irritante,

provoca lagrimeo, tos, estornudos, etc., y además daña el sistema respiratorio. Su color depende de los materiales que estén quemándose:

- Color blanco o gris pálido: indica que arde libremente.
- Negro o gris oscuro: indica normalmente fuego caliente y falta de oxígeno.
- Amarillo, rojo o violeta: generalmente indica la presencia de gases tóxicos.

**Llama:** La llama es un gas incandescente. Arderán siempre con llama los combustibles líquidos y gaseosos. Los combustibles líquidos se volatilizan, debido al calor y la elevada temperatura de la combustión, inflamándose y ardiendo como los gases. Los combustibles sólidos arderán con llama cuando se produzcan, por descomposición, suficientes compuestos volátiles, como sucede con las hullas grasas, las maderas, etc. El coque arde prácticamente sin llama, debido a la total ausencia de compuestos volátiles.

Como norma general se dice que, el fuego, en una atmósfera rica en oxígeno, es acompañado de una luminosidad llamada llama, que se manifiesta como el factor destructivo de la combustión, raramente separado de ella.

**Calor:** El calor es sumamente importante ya que es el culpable de numerosos incendios. La definición más aproximada de calor es la siguiente: "es el efecto del movimiento rápido de las partículas, conocidas como moléculas, que forman la materia".

Se conocen con certeza los efectos del calor y la importancia a la hora de hablar de incendios, por ello vamos a fijar los siguientes conceptos:

**Diferencia entre calor y temperatura:** Calor es el flujo de energía entre dos cuerpos con diferente temperatura. La temperatura nos indica el nivel de energía interna de cada cuerpo.

**Transmisión del calor:** En el estudio del fuego, es muy importante saber como actúa el calor y como se transmite, ya que es la causa más común de los incendios y de la expansión de los mismos. Las principales formas de propagación son:

- **Conducción:** Intercambio de calor que se produce de un punto a otro por contacto directo a través de un medio conductor. Ejemplo: Si se calienta el extremo de una barra metálica, al cabo de un rato el otro extremo también se habrá calentado.

- **Convección:** Es el proceso de transmisión del calor a través de movimientos del aire. Estas corrientes de aire se producen debido a que el aire caliente pesa menos, y por lo tanto se encontrará en los niveles más altos, y el aire frío pesa más, encontrándose en los niveles más bajos.

La expansión de un fuego por convección tiene más influencia que los otros métodos a la hora de definir la posición de ataque a un fuego. El calor producido por un edificio o una planta ardiendo se expandirá y elevará pasando de unos niveles a otros.

- **Radiación:** Es el proceso de transmisión de calor de un cuerpo a otro a través de un espacio.

El calor radiado no es absorbido por el aire, por lo que viajará en el espacio hasta encontrar un cuerpo opaco que sí lo absorba. El calor radiado es una de las fuentes por las cuales el fuego puede extenderse. Hay que prestar mucha atención, a la hora del ataque, a aquellos elementos que puedan transmitir el calor por este método. El calor del sol es el ejemplo más significativo de radiación térmica.

- **Contacto directo de la llama:** Cuando una sustancia es calentada hasta el punto en que emite vapores inflamables. Estos vapores, al entrar en combustión, hacen que ardan las sustancias de su alrededor y así sucesivamente.

**Gases:** Los gases son el producto resultante de la combustión. Pueden ser tóxicos, constituyendo uno de los factores más peligrosos de un incendio. El monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido, que se produce en combustiones incompletas. Reacciona con la hemoglobina impidiendo el transporte de oxígeno a través de la sangre. Su inhalación puede ser mortal. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas típico de la combustión. No es venenoso, aunque desplaza el oxígeno del aire pudiendo producir la muerte por asfixia. Se utiliza en muchos sistemas de protección para extinguir incendios en espacios cerrados o semicerrados, debido a su capacidad de desplazar el oxígeno. El cianuro de hidrógeno (HCN) se produce como resultado de la combustión de materiales que contienen nitrógeno como la lana y las fibras sintéticas. El ácido clorhídrico (HCl) se desprende cuando se calientan algunos materiales plásticos como el PVC (Enciclopedia Microsoft Encarta, 1999).

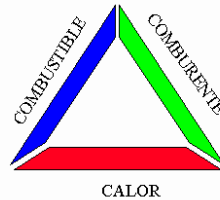
### **3.3 TRIÁNGULO Y TETRAEDRO DEL FUEGO**

El fuego no puede existir sin la conjunción simultánea del combustible (material que arde), comburente (oxígeno del aire) y de la energía de activación (chispas mecánicas, soldaduras, fallos eléctricos, etc).

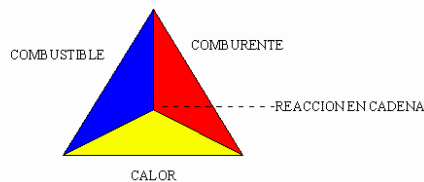
Si falta alguno de estos elementos, la combustión no es posible. A cada uno de estos elementos se los representa como lados de un triángulo, llamado Triángulo del Fuego, que es la representación de una combustión sin llama o incandescente.

Existe otro factor, "reacción en cadena", que interviene de manera decisiva en el incendio. Si se interrumpe la transmisión de calor de unas partículas a otras del combustible, no será posible la continuación del incendio, por lo que ampliando el concepto de Triángulo del Fuego a otro similar con cuatro factores obtendremos el Tetraedro del Fuego, que representa una combustión con llama (Ver figura 12).

### TRIANGULO DEL FUEGO



### TETRAEDRO DEL FUEGO



**Figura 12. Esquema con triángulo y tetraedro de fuego.  
Fuente: Manual de Seguridad Industrial, 1992.**

## **3.4 EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN**

Según Chakravorty y Kolada (1988), la combustión es una reacción química exotérmica, de oxidación-reducción (redox), que se desarrolla con suficiente velocidad para que los cambios en materia y energía y sus productos resultantes (gases, humos, luz, llamas y calor) sean perceptibles durante su desarrollo.

Los reactivos reductores constituyen el "combustible". Los agentes oxidantes son los "comburentes".

Para que exista una combustión deben concurrir:

- El combustible
- El comburente (en general, el oxígeno del aire)
- La energía de activación (necesaria para iniciar el proceso; calor, chispa eléctrica)

- Las condiciones que hacen posible las reacciones químicas intermedias del proceso (reacciones en cadena).

Consideremos un combustible, que puede ser sólido, líquido o gaseoso. El proceso de la reacción se desarrolla del siguiente modo:

- Si se aporta calor a un sólido que puede o bien calentarse, sin emitir gases ni vapores y, en tal caso, va adquiriendo temperatura y finalmente el sólido está cada vez más caliente (esto ocurre, en el acero); o bien comienza a emitir gases y vapores, procedentes de los productos volátiles contenidos en el sólido o como resultado de su propia pirólisis, (esto ocurre, en el carbón).
- Si se aporta calor a un líquido, cuando alcanza una cierta temperatura, empieza a emitir vapores, producto de su vaporización, (esto ocurre, en la gasolina).
- Si se aporta calor a un gas, además de calentarse, aumenta su volumen (si no está éste limitado por un recipiente).
- En cualquiera de los tres casos (combustible, sólido, líquido o gas), al calentarlos se producen gases, más o menos calientes, que se difunden en el aire, salvo en el caso particular del sólido que no emite gases ni vapores.

Los gases emitidos se mezclan en el aire y, por tanto, se difunden con oxígeno, de modo que, cuando sigue aumentando la temperatura por aportación de calor, llega un momento en que los gases reaccionan con el oxígeno (reacción de oxidación-reducción) en un proceso que se desarrolla por fases o reacciones intermedias (reacciones en cadena). La reacción de oxidación de los gases en el seno del aire da origen a las llamas (Bateman, 1982).

- El conjunto del proceso constituye una combustión completa que da como resultado calor, llamas, humos, y gases de la combustión. Parte del calor

permite mantener la combustión y el excedente es liberado al medio en que la combustión se está desarrollando.

- El sólido que al calentarse no emitió gases, o el que ya ha emitido todos los productos volátiles que contenía, también sufre una oxidación, en este caso superficial, que penetra hacia su interior, pero sin producir llamas, puesto que no destila vapores ni emite gases, y en este caso la combustión se denomina "incandescente" (o de brasas).

Solamente la reacción de oxidación-reducción entre los gases y el oxígeno necesita que sean posibles las reacciones intermedias de su proceso. Es decir, sólo cuando hay llamas es preciso que se puedan desarrollar reacciones intermedias en cadena, lo que es interesante tener en cuenta cuando se trata de extinguir el fuego.

### **3.5 CONCEPTO DE FUEGOS DE MINA Y PROBLEMAS ASOCIADOS**

Según Moreno (1975), los principales componentes elementales del carbón son carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), aunque la constitución química no está todavía perfectamente definida. Sin embargo, parece existir acuerdo en que el carbón está constituido por una macromolécula que contiene grandes bloques aromáticos, en los que se incorporan algunos átomos y grupos funcionales. Además de la matriz orgánica, también aparece abundante materia mineral unida al carbón.

Por otro lado, el proceso de absorción (acumulación del oxígeno de la atmósfera en la superficie porosa del carbón) está siempre asociado a la evolución del calor y, al menos en sus etapas iniciales, es bastante rápido. En este aspecto, el que una sustancia se absorba a un sólido va a depender de la naturaleza o propiedades físicas y químicas de ambos.



### **3.5.1 Problemas asociados a los fuegos de mina**

Los fuegos de mina pueden abarcar zonas muy amplias y extenderse aun más si no se les presta atención inmediatamente. Cada situación particular debe estudiarse a conciencia teniendo presentes las circunstancias específicas de la explotación y del método de laboreo.

Además de suponer unas pérdidas importantes de materia prima, los fuegos de mina dificultan el ritmo de trabajo normal, lo que produce una disminución en la producción y, en general, un motivo de distorsión sobre los rendimientos.

Estos fuegos pueden suponer también una amenaza para las estructuras, tanto interiores como del exterior, así como para las propiedades vecinas y pueden además dar lugar a problemas de contaminación del aire.

Sin embargo, todos estos problemas, aunque graves, se ven opacados por otros de carácter más inmediato, que surgen como consecuencia directa de los fuegos. En efecto, los humos causados por la combustión indeseada del carbón implica un grave riesgo.

Los humos implican la generación de una serie de gases, en su mayoría perjudiciales. Entre los gases comúnmente producidos en caso de fuego, el CO es el que representa el mayor riesgo. El CO engendra efectos muy dañinos sobre el organismo humano al desplazar al oxígeno en la sangre, puesto que posee una afinidad 300 veces mayor que el O<sub>2</sub> para formar un compuesto estable con la hemoglobina. El grado del daño causado por el CO depende de la concentración del gas y del tiempo de exposición, dando lugar a molestias y síntomas no peligrosos (dolor de cabeza, náuseas) para una concentración del 0,1% de CO durante una hora, hasta provocar la muerte para una concentración del 0,4% durante menos de una hora.

Otro de los gases generados en caso de fuegos es el  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, su toxicidad no aparece hasta concentraciones muy superiores a las que pueden encontrarse en la mina. Para un 2% de  $\text{CO}_2$  la respiración comienza a hacerse más profunda; con un 4-5% pueden aparecer síntomas de fatiga. Pero puede estarse respirando aire con contenido de hasta el 8-10% de  $\text{CO}_2$  durante horas sin que aparezca ningún efecto dañino apreciable.

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) también puede aparecer y se suele permitir una concentración máxima de 5 ppm para evitar daños en el organismo. Las concentraciones permitidas de otros gases también están restringidas, como la del dióxido de nitrógeno, ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (5 ppm) o la del sulfato de hidrógeno (HS) (20 ppm), aunque estos gases no suelen llegar a representar una seria amenaza en las minas de carbón.

Si se imagina una acumulación o lecho de polvo en la que se ha producido un autocalentamiento y se ha alcanzado la temperatura de ignición, aunque exteriormente no se observen llamas, resulta evidente que en su interior se estará produciendo una combustión. Si ahora el polvo acumulado pasa repentinamente a la atmósfera en forma de nube debido a una sacudida o a vibraciones o incluso por el efecto de una onda de presión, se habrá formado una suspensión de partículas incandescentes a las que el oxígeno tiene ahora fácil acceso, de forma que se generaran llamas casi instantáneamente; estas llamas encuentran las condiciones propicias para propagarse a las partículas vecinas que constituyen la nube de polvo, lo que dará lugar al fenómeno de combustión rápida que constituye el proceso de explosión.

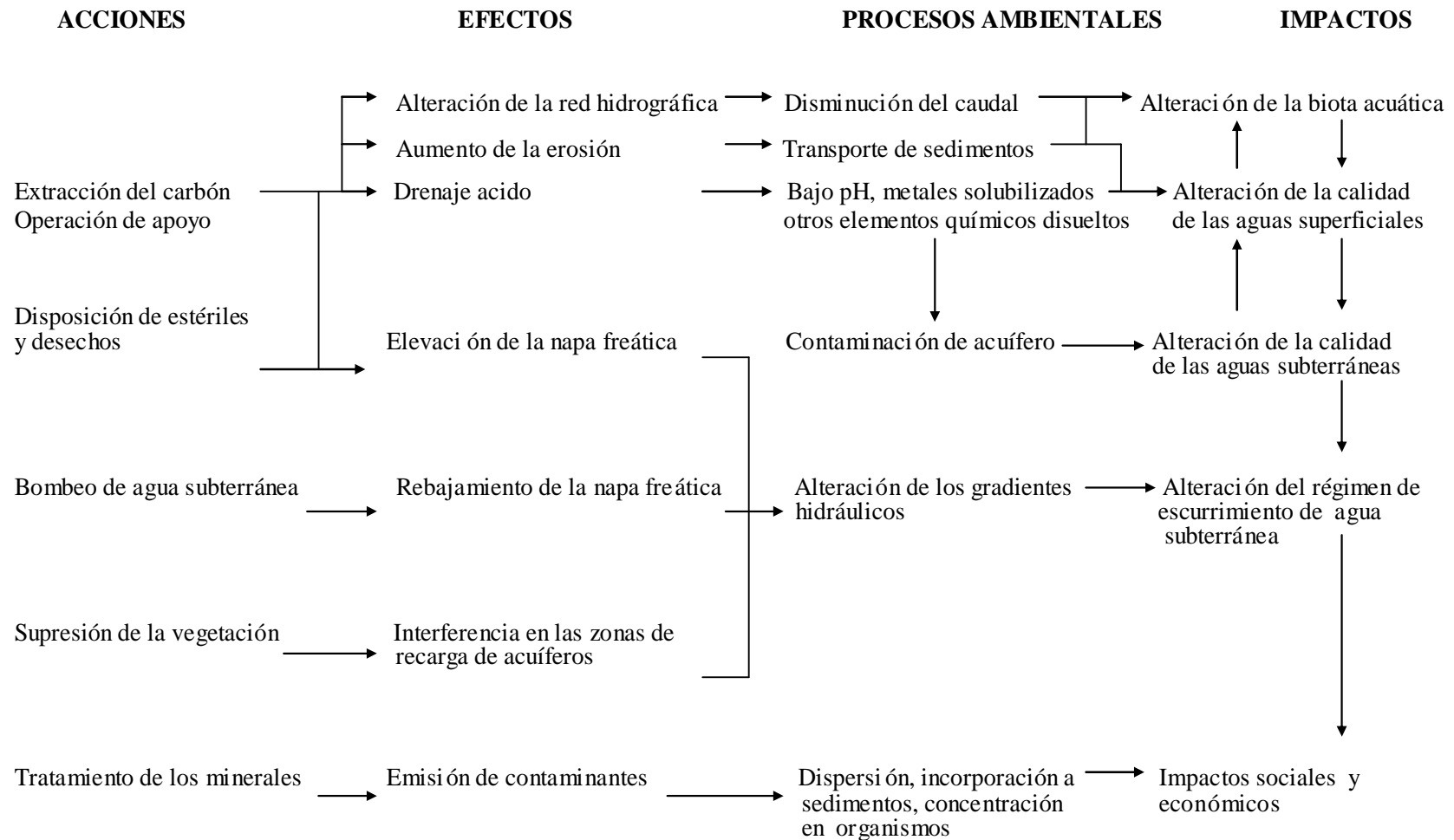
El Drenaje Acido de Mina (DAM) se origina cuando las rocas con minerales sulfurosos, como piritita, calcopiritita, pirrotita, marcasita, galena, arsenopiritita, etc., son expuestas a la acción del aire y del agua, comenzando en la superficie mineral un proceso complejo que engloba en su desarrollo fenómenos químicos, físicos y

biológicos. De una forma muy simplificada, su evolución se puede resumir en los siguientes puntos:

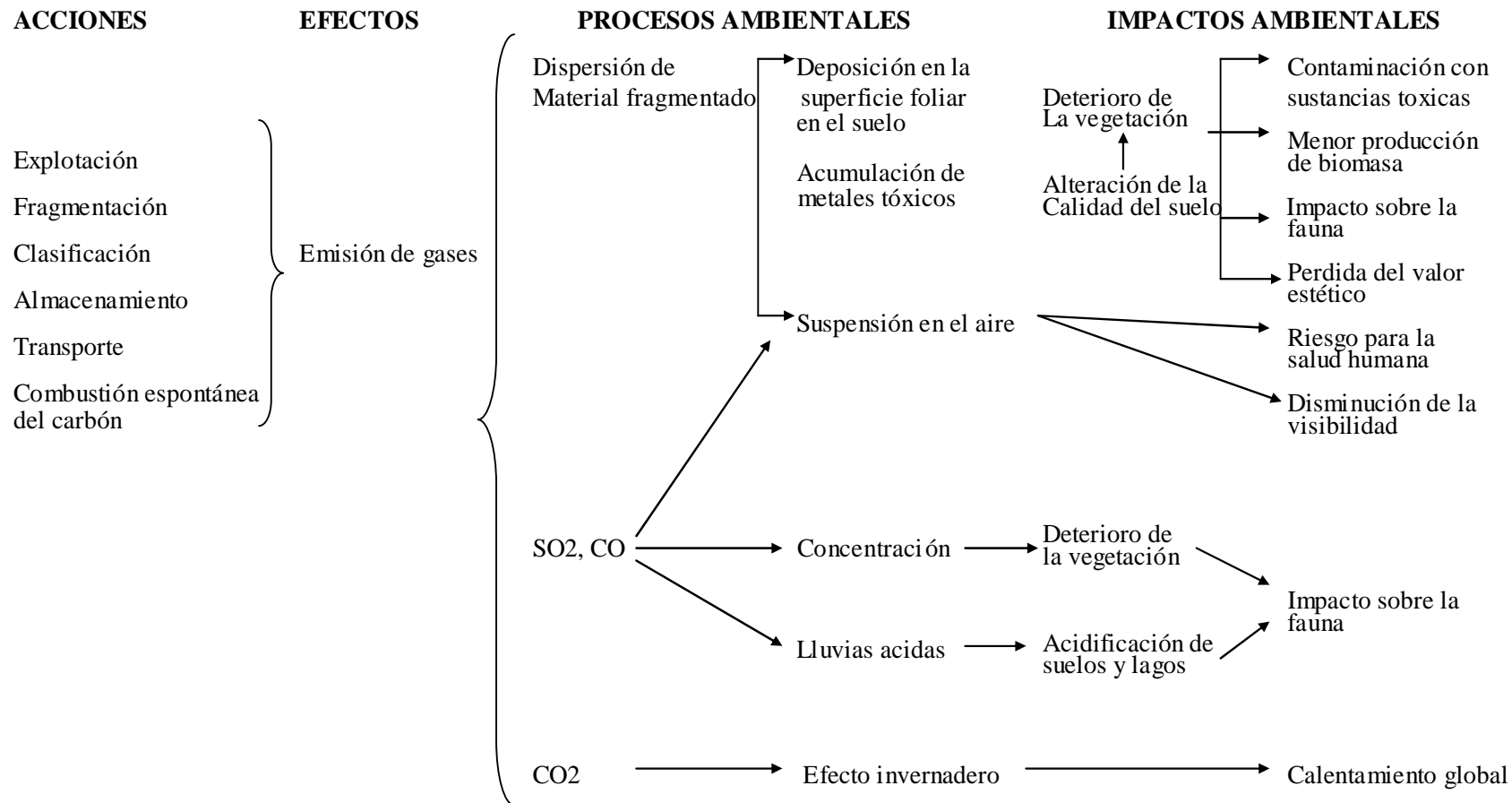
- Procesos de oxidación, que transforman los sulfuros en sulfatos con producción de ácido; estos procesos pueden ser químicos.
- Reacciones secundarias entre los productos de las reacciones anteriores y los restantes minerales presentes en la roca; así, el ácido generado disuelve metales pesados tales como plomo, cinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, etc.
- Disolución y arrastre de estos productos por el agua de lluvia o de escorrentía, produciéndose un caudal líquido contaminante que se caracterizará por su acidez y por las altas concentraciones en sulfatos y metales pesados.

Los principales focos productores del DAM en las explotaciones mineras son los drenajes de las minas subterráneas, por bombeo en las minas activas, las escorrentías en la minería a cielo abierto y los lixiviados de las escombreras y residuos mineros. En algunos casos, el agua que sale de estos focos lleva altas concentraciones metálicas. Cuando el DAM formado en estos focos alcanza las aguas limpias de la red hidrográfica las contamina en acidez, sulfatos y metales pesados. Sin embargo, el grado de acidez y las concentraciones en contaminantes de las aguas, río abajo, serán función de la envergadura del aporte contaminante del DAM recibido, así como del caudal diluyente que traiga el curso de agua. De igual forma, la infiltración del DAM puede contaminar suelos y aguas subterráneas.

En las figuras 13 y 14 se muestran los principales impactos causados por la minería del carbón en la hidrósfera y en la atmósfera.



**Figura 13. Principales impactos de la minería del carbón en la hidrósfera.**  
**Fuente: Aspectos geológicos de protección ambiental, UNESCO, 1995.**



**Figura 14. Principales impactos de la minería del carbón en la atmósfera.**  
 Fuente: Aspectos geológicos de protección ambiental, UNESCO, 1995.

### 3.6 TEORÍAS SOBRE LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN

Las principales teorías de autoinflamación del carbón son: Pirítica, Bacterial y teoría del Complejo Carbono-Oxígeno.

La teoría pirítica, que según Urbani (1987-1990), aclara la autoinflamación del carbón por la presencia en éste de inclusiones de pirita, que bajo la acción del oxígeno del aire y del agua se transforma en sulfato de hierro ( $\text{FeSO}_4$ ), con importante desprendimiento de calor, y calienta el carbón hasta la temperatura de inflamación. Pero, esta teoría fue rechazada por Miron (1994), quien ha demostrado que el carbón puede autoinflamarse en completa ausencia de pirita.

La teoría bacterial admite como causa del calentamiento del carbón los procesos vitales de las bacterias, que ayudan a la oxidación de la sustancia orgánica de los carbones. Pero, los estudios posteriores han demostrado la inconsistencia de esta teoría, ya que la influencia de las bacterias es insignificante.

En el presente, es más aceptada la teoría del complejo carbono-oxígeno. Según Van Vuuren (1995), la autoinflamación del carbón se debe a que el carbón absorbe el oxígeno del aire dado que, al comienzo, se forman compuestos inestables en la superficie del carbón: OH, COOH, CO, acompañados del desprendimiento de una pequeña cantidad de calor. A medida que aumenta la acumulación del calor, aumenta también la velocidad de interacción entre el oxígeno y el carbono. Los átomos de oxígeno, al penetrar dentro de las moléculas, forman complejos más complicados de carbono-oxígeno. Los compuestos inestables formados anteriormente se descomponen con desprendimiento de humedad, anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), óxido de carbono (CO), etc. El segundo período del proceso se acompaña por intensa formación de calor, 60 a 70%, de todo el calor producido por la oxidación del carbón.

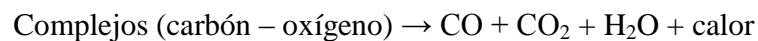
El calor acumulado acelera el proceso de autoinflamación del carbón, y a temperatura de 300 a 350°C éste pasa al estado de combustión.

### 3.6.1 El Autocalentamiento del carbón

El carbón empieza a oxidarse en cuanto entra en contacto con la atmósfera. Se trata de un proceso exotérmico que eleva la temperatura, lo cual favorece la reacción y el calentamiento se va incrementando, pudiendo alcanzar la temperatura de inflamación. Por debajo de 80 °C la reacción se puede esquematizar de la siguiente forma:



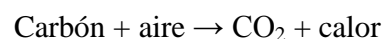
A temperaturas superiores a los 80°C esos complejos formados entre el carbón y el oxígeno pueden descomponerse:



Esta propiedad que tiene el carbón de liberar calor cuando está en contacto con el oxígeno del aire, unida a su baja conductividad térmica, favorecen la acumulación de calor, lo que puede generar un continuo calentamiento.

Evidentemente, la liberación de calor en el carbón debido a su interacción con el oxígeno no es suficiente; las condiciones físicas deben ser tales que se verifique una situación de acumulación de calor para la iniciación del fenómeno de calentamiento espontáneo. Así pues, se facilitará ese calentamiento espontáneo cuando la cantidad de carbón presente sea muy grande y cuando la ventilación no sea muy baja (se impide la interacción carbón-oxígeno) ni muy alta (disipa el calor generado en el proceso).

Por tanto, si no existe una adecuada disipación del calor liberado se puede alcanzar una auténtica combustión en el aire:



Puede estimarse que por cada 10°C que aumente la temperatura, la velocidad de oxidación prácticamente se duplica.

El tiempo transcurrido entre el momento en el que el carbón es sometido a las condiciones favorables para el calentamiento espontáneo y el punto en el que se alcanzan las condiciones de ignición se suele denominar período de incubación.

Si por el contrario, las condiciones propias de la mina o del método de laboreo no permiten la acumulación de calor, el calor liberado en la iteración entre el carbón y el oxígeno se disipará. La superficie del carbón afectado alcanza un estado de saturación de forma que, a temperatura ambiente, ya no tiene lugar ninguna otra interacción con el oxígeno.

### **3.6.2 Físico-química del autocalentamiento del carbón**

Hay autocalentamiento si los fenómenos exotérmicos que se sitúan en la masa del carbón desprenden una cantidad de calor superior a la que es evacuada por conducción y sobre todo por la circulación de aire, la descripción del proceso puede distinguir 3 fases sucesivas: la oxidación a base de temperatura, la pirólisis y la combustión.

#### **Oxidación del carbón a partir de la temperatura ambiente**

- 1) El carbón fija el oxígeno a la temperatura normal del fondo; medida por la cantidad de oxígeno fijada por unidad de tiempo y por unidad de masa de carbón, la velocidad de oxidación tiende a aumentar con la temperatura pero a disminuir con el tiempo, en ausencia de fenómenos aceleradores la auto oxidación del carbón no parece susceptible de degenerar en fuego.
- 2) Pero a baja temperatura pueden intervenir la acción catalítica de la pirita y la fijación de humedad.



La velocidad de oxidación del carbón aumenta considerablemente en medio húmedo en presencia de ciertas formas de pirita finamente divididas, por la acción catalítica del ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ); cristalizada en gruesos granos la pirita parece por el contrario sin efecto. La fijación del 1% de humedad en condiciones adiabáticas eleva la temperatura del carbón más de  $20^{\circ}\text{C}$ .

Ello es posible cuando el carbón, normalmente poco más o menos saturado de humedad en el fondo, ha sido previamente desecado y después puesto en contacto en el aire húmedo, por causa de inversiones del sentido de circulación de las infiltraciones de aire o de variaciones notables de humedad de la atmósfera.

El fenómeno es importante con carbones jóvenes, porosos y susceptibles de fijar hasta 8 y 10% de humedad, mientras que los carbones más antiguos son saturados con 1,5 a 3,5% de agua.

Cuando la temperatura se eleva, la humedad del carbón disminuye, la vaporización absorbe calor y la acción catalítica de la pirita decrece, pero la velocidad de oxidación es más grande que en frío.

- 3) La elevación de temperatura provoca el desprendimiento de cantidades crecientes de ciertos gases.
  - Gases absorbidos por el carbón, metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) y gas carbónico ( $\text{CO}_2$ ), que constituye el grisú.
  - Pero también gases característicos de un calentamiento, que aparecen en cantidades notables al lado de ciertos umbrales, variables según la naturaleza del carbón.

El óxido de carbono se forma en frío, pero en cantidades rápidamente crecientes a temperaturas superiores a 75°C para carbones de calidades medias, 125°C ó 150°C para carbones de clases altas.

Después aparecen sucesivamente hidrógeno, etileno CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub> y trazas de propileno CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>, homólogo superior del etileno.

- 4) La temperatura se eleva primero lentamente, pero el proceso se acelera y tiende a hacerse irreversible, próximo al umbral de 75°-80°C, al menos si la alimentación de oxígeno persiste en condiciones sensiblemente adiabáticas.

### **Pirólisis del carbón**

La descomposición térmica del carbón se manifiesta entre 450° y 850°C, ésta desprende alquitranes, gases en cantidades crecientes, esencialmente H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y carburos aromáticos delatados por el olor fino, persistente, más bien agradable de respirar.

### **Combustión del carbón**

Se puede considerar que comienza hacia 800°C, la temperatura puede alcanzar 1.200-1.250°C, el carbón se hace incandescente y las llamas aparecen si la alimentación en oxígeno es suficiente. En los humos, el contenido en CO<sub>2</sub> es siempre superior al contenido en CO, el olor es desagradable.

## **3.7 MECANISMOS DE LA REACCIÓN**

En general, la tendencia del carbón al autocalentamiento disminuye a medida que el rango del carbón aumenta, es decir, es mayor en un lignito que en una antracita.

Por otro lado, se ha observado que la facilidad para el calentamiento espontáneo aumenta al reducirse el tamaño de las partículas, pues hay mayor área superficial disponible y, además, se mejora la transferencia de calor entre granos. Sin embargo, existe un tamaño crítico por debajo del cual la velocidad de oxidación permanece prácticamente constante.

Todo ello, unido a algunas observaciones microscópicas ha conducido a afirmar que la oxidación del carbón y, por tanto, su autocalentamiento, es un proceso que tiene lugar fundamentalmente en superficie. Las fuerzas de atracción entre el oxígeno y la superficie del carbón pueden variar enormemente, de manera que a bajas temperaturas se tiene absorción física, mientras que a mayores temperaturas el proceso se debe a la absorción química, seguida de las reacciones que dan lugar a productos tales como CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, etc.

Las reacciones químicas que dan lugar a esos gases no son, en general, sencillas. En efecto, el proceso se ha descrito mediante una serie de reacciones consecutivas, cuya cinética viene marcada por la aparición de un compuesto intermedio que es el que regula la velocidad global del proceso. A su vez, la formación y descomposición de ese complejo intermedio depende de la temperatura del sistema.

El complejo intermedio se ha descrito como un compuesto formado por el carbón más el oxígeno, que se suele denominar oxicompuerto. Midiendo las concentraciones de los gases producidos a diferentes temperaturas, se ha llegado a la conclusión de que el punto crítico a partir del cual la velocidad de descomposición del oxicompuerto se hace mayor que la de su formación se sitúa en torno a los 70 – 80°C.

Durante el proceso de oxidación del carbón se produce una serie de cambios en su estructura. Así, una vez superada la temperatura crítica, la reacción progresa y la estructura del carbón comienza a romperse. Por debajo de 220°C se produce

fundamentalmente la oxidación de la estructura no aromática del carbón, permaneciendo prácticamente inafectados los anillos aromáticos hasta temperaturas superiores.

Cuando la reacción se acelera y la temperatura comienza a elevarse es más que notable que se produzca una pirólisis del carbón con la consiguiente liberación de volátiles. A partir de entonces habrá reacción tanto en fase homogénea como en fase heterogénea, dependiendo la preponderancia de la velocidad de calentamiento y del tamaño de las partículas, al igual que ocurre en el proceso normal de combustión del carbón.

### **3.8 CONDICIONES PARA LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN**

Según Chakravorty y Koleda (1988), las condiciones básicas para la autoinflamación del carbón son: Tendencia a la oxidación, mala transmisión del calor y afluencia del aire. Cuando falta una sola de estas condiciones, la autoinflamación no se produce.

Se considera que cada fuego pasa por cinco estados o fases:

- Período de incubación.
- Autocalentamiento.
- Autoinflamación.
- Combustión.
- Apagamiento.

Durante el período de incubación, el carbón en contacto con el aire empieza a oxidarse lentamente a baja temperatura y a activarse por sí solo. El calor producido en el proceso alcanza a disiparse.

En la segunda fase del fuego, autocalentamiento debido a la oxidación acelerada, la cantidad de calor que se forma es mayor de la que se disipa. Se produce

un aumento visible de la cantidad del CO<sub>2</sub> y del CO, así como la separación de humedad en las paredes de las labores. Al final del período, la temperatura del carbón alcanza 70°C.

Al llegar el carbón a la temperatura crítica, la velocidad de la oxidación aumenta y se produce la inflamación. En esta tercera fase del incendio, aumenta la destilación seca, con separación de los gases combustibles, así como de cantidades mayores de CO. También aparece el olor característico, se observa el aumento de temperatura del aire de la mina y de las rocas y, por fin, aparece el humo. La duración de la fase por las causas anteriores abarca desde algunas horas hasta algunas semanas.

Si no se ha alcanzado la temperatura crítica, o si a consecuencia del cambio de las condiciones anteriores aumenta la eliminación del calor, se produce el enfriamiento. Después, el carbón se meteoriza y se hace inerte.

La cuarta fase, combustión, se caracteriza por la formación de importantes cantidades de CO<sub>2</sub>, frecuentemente también de CO, fuerte disminución de la cantidad de oxígeno en el aire, formación de humo y, a veces, aparición del fuego abierto. La temperatura, en el foco del incendio, puede alcanzar 1000°C y más.

La última fase, apagamiento, se caracteriza por el enriquecimiento del aire en CO<sub>2</sub> y la disminución consiguiente del contenido de oxígeno. También disminuye la concentración de gases combustibles y del CO. Con el tiempo, la temperatura del aire se hace normal.

### **3.9 PRINCIPALES FACTORES INCIDENTES EN LA AUTOCOMBUSTIÓN DEL CARBÓN**

La autoinflamación del carbón que es el origen de los fuegos depende fundamentalmente de los siguientes factores: Características genéticas y naturales del yacimiento (espesor del manto, pendiente, composición del carbón, estructura geológica y actividad química), conjuntamente con las derivadas del método y

condiciones de la explotación (avance o retirada, relleno o hundimiento, ritmo de los trabajos de laboreo).

Unos y otros influyen más o menos, de manera aislada o conjuntamente, de forma que si bien existen experiencias sobre la influencia de determinadas condiciones así como sobre el efecto simultáneo de varias de ellas, la realidad es que todavía no se cuenta con conocimientos científicos seguros.

En cualquier caso se demuestra que la formación de una combustión espontánea de carbón necesita de la conjugación de una serie de factores, algunos de estos factores es favorecida por las características generales del yacimiento y de la explotación, por lo que las características geológicas del yacimiento y la modalidad de la técnica minera empleada son factores decisivos en la formación de combustiones espontáneas.

### **3.9.1 Factores derivados de las características genéticas y naturales del yacimiento**

#### **Susceptibilidad**

Carbones de todas las clases: antracitas, hullas y lignitos han sido objeto de calentamientos y fuegos en capas de pendientes variadas y a distintas profundidades. Se califica como susceptible un carbón capaz de calentarse espontáneamente.

#### **Influencia de la pirita y del grado de humedad**

Los estudios de laboratorio han demostrado para un gran número de capas que la susceptibilidad del carbón está ligada al contenido de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) y a la existencia de condiciones que permitan a la pirita transformarse en sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ).

Para contribuir a la susceptibilidad, la pirita ha de estar finamente dividida y el contenido de azufre pirítico debe sobrepasar el 2% (Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE, 1992).

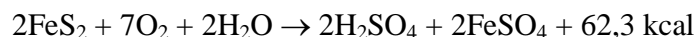
La ausencia de condiciones que permitan transformarse a la pirita rápidamente en sulfato férrico podría explicar que algunas vetas muy piritosas no sean susceptibles.

Por el contrario ciertas vetas muy pocas o nada piritosas, pueden ser susceptibles. Este es el caso de carbones muy porosos. Es posible que su calentamiento sea el resultado de la fijación de la humedad, aportada por el aire en forma de vapor.

La reacción de oxidación de la pirita en aire húmedo puede representarse mediante la siguiente reacción:



o también según:



Ambas reacciones muestran el efecto exotérmico, pero también puede verse que los productos de la reacción tienen un volumen mucho mayor que el de la pirita inicial. En consecuencia, los gases producidos pueden provocar la rotura del carbón en el que estén embebidos, produciendo así un aumento de la superficie del carbón en contacto con el aire que le rodea.

Un carbón que esté más seco de lo correspondiente a su humedad en la capa manifestará su carácter higroscópico y tenderá a reabsorber o ganar humedad siempre que esté en un ambiente de elevada humedad.

Este proceso de humidificación es exotérmico y generará calor, llegando a ser el calor generado incluso mayor que el debido a la oxidación anteriormente descrito.

### **Composición química y grado de metamorfismo**

Con el aumento del grado de metamorfismo del carbón su tendencia a la autoinflamación disminuye. Los carbones pardos son más autoinflamables que los negros, y dentro de los últimos, son más peligrosos a la autoinflamación los carbones de llamas largas y los carbones de gas (hulla). Más raramente se inflaman las antracitas.

### **Meteorización**

El carbón meteorizado no es propenso a la autoinflamación, pues la meteorización del carbón presenta el proceso de su oxidación lenta, bajo condiciones de disipación constante y eliminación del calor y de los productos de oxidación que se forman.

### **Textura y estado físico del carbón**

Al disminuir el tamaño del grano aumenta la toma de oxígeno; de aquí la gran importancia de la granulometría. Los carbones de textura fina son los más peligrosos.



El grado de autoinflamación del carbón depende también del grado de trituración, quebradez del carbón, su humedad, temperatura, gases absorbidos en el carbón (metano y otros hidrocarburos), afluencia de oxígeno.

Los carbones quebradizos son más accesibles al oxígeno del aire y por esto más activos con respecto a la autoinflamación. También la humedad facilita la fracturación del carbón y además la actividad del oxígeno en estado disuelto en agua es mayor.

### **Constituyentes del carbón**

Los componentes petrográficos del carbón tienen diferente inclinación a la oxidación. A bajas temperaturas, la fusinita absorbe más activamente el oxígeno, ya que es fibrosa y constituye la parte más blanda del carbón. A temperaturas mayores, absorben más intensamente el oxígeno la vitrinita y la clarinita. La durinita es más estable.

Desde el punto de vista petrográfico se puede establecer una clasificación de los carbones según sus constituyentes (macerales). Estos pueden tener su origen en los tejidos corticales o leñosos (vitrinita, fusinita), en otras partes de las plantas (esporinita, cutinita) o en lodos húmicos (micrinita). Algunos de estos macerales tienen una mayor tendencia a reaccionar con el oxígeno, pero para establecer una clasificación práctica de los carbones en cuanto a su susceptibilidad relativa a la combustión espontánea es necesario considerarlos como un todo, pues de otra forma habría que tener en cuenta la distribución de los macerales en cada carbón.

### **Contenido en volátiles**

Si bien el contenido en volátiles es un factor importante, no se presentan diferencias notables en su contenido entre capas más susceptibles. El contenido en

volátiles se reparte en un abanico bastante amplio sin una dominante neta en cuanto a la susceptibilidad de la capa.

### **Contenido en cenizas**

No se ha encontrado ninguna relación directa entre susceptibilidad y contenido en cenizas. Aunque según Amoros (1982), el alto contenido de cenizas disminuye el calentamiento del carbón, y por lo tanto se inhibe la autocombustión.

### **Tectónica y friabilidad**

Las irregularidades tectónicas facilitan el desarrollo de los fuegos. Según van Vuuren (1995), se ha podido probar que la proximidad de una falla tiene una incidencia neta sobre los puntos de combustión espontánea. Se encuentran por otra parte razonamientos tanto físicos como químicos que justifican estas afirmaciones:

- Una falla aporta a menudo al contacto del carbón y del agua elementos minerales catalizadores de las reacciones de oxidación.
- Aumenta la friabilidad y porosidad del carbón y por consiguiente su permeabilidad al aire y su reactividad.

### **Características geológicas del yacimiento**

Sobre el mayor o menor riesgo influyen las características geológicas de la zona. Si el carbón aparece en capas finas y distribuidas en lugar de una capa única de mayor potencia, es frecuente que aparezcan grietas o fisuras y el carbón sea, normalmente, más friable. En consecuencia, la conductividad térmica del carbón será menor y el riesgo de autocalentamiento aumentará.

La profundidad de la capa es también importante, pues si ésta tiene una gran carga es más probable que aparezcan fisuras debido a las grandes presiones, lo que aumenta el riesgo. Si, por el contrario, el recubrimiento es excesivamente pequeño (menor de 50m), entonces el aire exterior puede tener un acceso más fácil a la capa, lo que favorecerá cualquier proceso de combustión espontánea.

Naturalmente, todo lo anterior depende en gran medida del grado de compactación del terreno. Cuanto más consolidado sea, más dificultad tendrá el aire para llegar a la zona de autocalentamiento y, además, mayor será la conductividad térmica, lo que evitará la acumulación de calor.

Finalmente, cuando la capa es de mucha potencia también aumenta el riesgo de fuego espontáneo, especialmente si baja el grado de extracción.

### **Potencia de capa**

Las capas potentes son más difíciles de explotar íntegramente y que el riesgo de dejar carbón en los frentes y de formación de corrientes parasitas es mayor, con lo cual aumenta la posibilidad de creación de focos potenciales de fuegos.

### **Pendiente de la capa**

La importancia de la pendiente de la capa en la formación de fuegos reside en el hecho de la mayor dificultad que entraña la explotación de capas muy inclinadas.

### **3.9.2 Factores derivados del método y condiciones de la explotación**

#### **Influencia del sistema de explotación**

En general cuanto más rápidamente se haga el arranque, cuanto más completo sea éste (sin dejar carbón) y cuanto antes se aislen de la ventilación las zonas explotadas, menor será el riesgo de autoinflamación.

El método de extracción puede entrañar riesgos adicionales. Así, en general, puede afirmarse que los huecos dejados aumentan el riesgo, como también lo hace el dejar carbón sin extraer.

#### **Ventilación**

La ventilación juega por tanto un papel muy importante. En consecuencia, si ésta es muy baja no puede tener lugar la oxidación por falta de aire, y si es lo suficientemente elevada impide la acumulación del calor producido en la oxidación.

#### **Acción del agua**

Muchas combustiones espontáneas son consecuencia de la evacuación del agua después de una inundación prolongada del macizo. Cuando tiene lugar una inundación del macizo se puede pensar que esto supone que las nuevas superficies formadas bajo el agua están preservadas de la oxidación o que las superficies oxidadas después de la inundación están parcialmente desoxigenadas; sin embargo, esto no es así, ya que un reemplazamiento rápido del agua por un flujo de aire pone en contacto gran número de superficies iguales de un carbón húmedo en curso de fisuración rápida.

### **Entorno minero**

Cuanto mayor es la acumulación de carbón, especialmente si éste es de tamaño reducido (polvo), mayor es el riesgo de autocalentamiento.

Si existe una elevación de la temperatura, bien sea por el gradiente geotérmico, por la presencia de manantiales termales o por la existencia de fuegos previos, mayor será el riesgo de autocombustión.

Los contenidos elevados de humedad suelen facilitar el calentamiento espontáneo, aunque si se llega a valores suficientemente altos de humedad el riesgo disminuye.

Las velocidades elevadas de emisión de gases traen como consecuencia una reducción del contenido en oxígeno del aire, lo que dificulta la oxidación del carbón, reduciendo el riesgo.

En general, puede afirmarse que las siguientes características aumentan el riesgo de combustión espontánea del carbón:

- Espacio suficiente para la liberación de la humedad del carbón.
- Largos períodos de exposición de la superficie del carbón.
- Incremento del área superficial.
- Suministro de aire a la superficie del carbón.

### **3.9.3 El desprendimiento de monóxido de carbono**

Según Cliff (1992), en la combustión del carbón se originan CO<sub>2</sub>, CO y calor. La valoración de mas de diez mil análisis de gases de combustión que se tomaron por la Central de los Servicios de Salvamento Minero de Essen en diferentes fuegos de minas, indicó que, independiente de la cantidad de aire y del tipo y cantidad de material combustible, en los fuegos de mina abiertos el contenido de CO en el aire

quemado se relaciona con su contenido de CO<sub>2</sub> en la proporción 1:10, es decir en los fuegos de mina se queman diez partes del carbono existente hasta dióxido de carbono y una parte hasta CO.

A causa de la gran cantidad de CO<sub>2</sub> que se forma debiera este gas, en principio, seleccionarse como indicador de los fuegos de mina. Pero en su contra hay tres razones:

1. El CO<sub>2</sub> es muy soluble en agua. 1.000 cc de agua disuelven a 20°C, 878 cc de CO<sub>2</sub>; por el contrario en 1.000 cc de agua sólo se disuelven 23 cc de CO. Ya que en muchos fuegos de mina entran en acción dispositivos de apagado con agua, se lavaría una gran parte del CO<sub>2</sub> originado en la combustión.
2. El CO<sub>2</sub> del aire de las minas proviene, además de los fuegos de mina, de las siguientes causas:
  - a) Del ocluido de las rocas, originado en carbonización por causas de oxidación.
  - b) Por oxidación lenta en las explotaciones mineras abiertas.
  - c) Por descomposición bacteriana y putrefacciones, y
  - d) Por el funcionamiento de las máquinas de combustión.

Las causas de la formación de CO, aparte de los fuegos de mina, son esencialmente el funcionamiento de los equipos con diesel y el trabajo de voladuras de roca.

3. Si se considera la acción toxicológica del CO<sub>2</sub> y del CO, se comprueba que el CO<sub>2</sub>, es peligroso en el aire a partir del 3 a 4% en volumen y es mortal desde 8% en volumen. La acción toxica del CO se sitúa en el 0,2% en volumen.

Así, desde el punto de vista de la seguridad, todo inclina a la elección del CO como indicador de fuegos de mina.

El desprendimiento de CO en los fuegos de minas es, pues, notable y alto ya al comienzo de un fuego abierto. En todos los fuegos de las minas de carbón aparece CO y, en verdad, independientemente del tipo de combustible y de la cantidad existente de oxígeno y aire.

En la terminología internacional para gases tóxicos, el establecimiento de la llamada concentración máxima en el puesto de trabajo (valor MAK) se calcula con magnitudes en ppm (partes por millón) =  $\text{cm}^3/\text{m}^3$ . Puesto que ello es cómodo, particularmente con pequeñas concentraciones se recomienda el empleo de esta unidad de cálculo. Por ejemplo 0,0001 vol % de CO = 10 ppm y 10 litros de CO en  $10.000 \text{ m}^3 = 1 \text{ ppm}$ .

La formación de CO en el trabajo con barrenos depende abiertamente del tipo y envase del explosivo así como del material que se encuentra en el disparo. Los disparos en bordes, así como los que dan deflagrantes, posiblemente suministran más CO.

No existen hasta ahora investigaciones minuciosas sobre la cantidad de estos gases obtenida por kg de explosivo. Según las investigaciones en la Unión Soviética la cantidad de gases desprendidos con los explosivos allí empleados asciende de 5 a 20 litros de CO/kg.

### **3.10 METODOS DE DETECCION DE FUEGOS**

Síntomas concluyentes para la detección de fuegos son: elevación de temperatura, humo, gases de combustión, llamas, radiación infrarroja, pudiendo agruparse los métodos más frecuentemente empleados de la siguiente manera:

### **3.10.1 Observación de síntomas físicos**

El desarrollo de un calentamiento en la masa o capa de carbón suele ir acompañado por la aparición de varios fenómenos, algunos de los cuales son fácilmente apreciables por nuestros sentidos.

Uno de los síntomas más claros que permiten conocer la existencia de un fuego es el olor. Este es debido a la destilación de algunos productos del carbón, como hidrocarburos saturados. El olor es tan característico que no suele inducir a error.

Cuando progresa el autocalentamiento y se supera la temperatura de ignición, es decir, cuando surge el fuego propiamente dicho, hacen su aparición los humos debidos a la combustión del carbón, que son fácilmente perceptibles.

En ocasiones pueden llegar a oírse ruidos característicos debido a la rotura o desmoronamiento de estratos, aunque su identificación suele ser más complicada. Las observaciones visuales u olfativas no pueden pues detectar el nacimiento de un calentamiento, una detección más precoz reposa sobre la búsqueda del CO, cuyo desprendimiento es sensible a baja temperatura y aumenta cuando la temperatura se eleva; otros métodos permiten verificar la realidad de la alerta y localizar el calentamiento.

### **3.10.2 Inspección térmica**

Mucho antes de que surja el fuego en la mina, la temperatura en el interior tiende a mostrar un aumento debido al calentamiento espontáneo. En consecuencia, una forma de prevenir el fuego será detectar esos aumentos de temperatura mediante una inspección sistemática de las temperaturas, especialmente en zonas de mayor probabilidad, como son labores abandonadas, especialmente si hay grietas o fisuras, lugares donde se acumula el carbón, sobre todo si lo hace en forma de polvo, etc.



Para la medición de la temperatura pueden usarse métodos directos o indirectos. Los primeros se basan en la introducción de un elemento sensor a la temperatura, como puede ser un termopar, en la zona donde se sospecha que puede haber autocalentamiento. Los métodos indirectos consisten en la detección a distancia de cambios de temperatura; los elementos más empleados son los termómetros o pirómetros infrarrojos, que captan las radiaciones emitidas por los focos caloríficos.

### **3.10.3 Análisis del aire de la mina**

Los productos gaseosos generados durante el calentamiento del carbón pueden desplazarse fácilmente hasta zonas alejadas del foco de calor debido no ya sólo a la ventilación, sino también a las corrientes convectivas engendradas por las diferencias térmicas.

Algunos de los métodos de análisis más corrientes se basan en la detección de gases emanados como consecuencia del calentamiento; tal es el caso del CO o de algunos hidrocarburos no saturados. Otros se basan en la disminución del CO emitido en los instantes iniciales como consecuencia de la evolución del fuego. Finalmente, hay métodos basados en la medición de las proporciones relativas de algunos de los gases presentes, como es el caso de las relaciones CO/O<sub>2</sub>, CO/CO<sub>2</sub> y CO/H.

## **3.11 CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS**

En este trabajo no se pudo realizar los análisis respectivos a la determinación de bacterias termofílicas, debido a que no se consiguió a tiempo el laboratorio donde se pudiera practicar dicho análisis, por consiguiente se describirán estas bacterias para su futura determinación en otros estudios.

Existen muchas especies de bacterias termofílicas, que colonizan a altas temperaturas ambientales. Son bacterias que para poder sobrevivir y reproducirse necesitan de un ambiente de extremo calor. La temperatura a la que estas bacterias están adaptadas sobrepasa, en algunos casos, los 90°C.

Las archaeobacterias (AB) en general (también llamadas arqueobacteria), son microorganismos unicelulares, procarióticos, que no requieren de oxígeno obligadamente, ni luz solar para crecer. Desde el punto de vista genético, éstas están relacionadas con las bacterias típicas en donde se localizan los sitios con temperatura, pH, presión atmosférica y profundidad extrema (Achenbach, *et al.*, 1987; Bateson, *et al.*, 1989). Antes de su descubrimiento las células individuales se dividían en general en procariotes y eucariotes, en función de la presencia o ausencia de una membrana nuclear. Dado que las AB no la poseen se les clasificó desde el principio como parte del segundo grupo (Beaty y MacInerney, 1989).

Investigaciones posteriores probaron que tienen un perfil genético más cercano a las eucariotes que a las procariotes; en consecuencia se clasifican en esta nueva rama biológica conocida como archaeobacteria (Eggen, *et al.*, 1990; Fukusumi, *et al.*, 1988.)

Las archaeobacterias hipertermoacidofílicas (AHA) crecen en condiciones extremas ambientales como la temperatura, en la cual se desarrollan sobre los 80°C o superiores, incluso en el punto de ebullición del agua (Bryant y Adams, 1989; Dweyer, *et al.*, 1988), en la condición típica de fumarolas, manantiales termales y de aguas sulfurosas (Bryant y Boone, 1987; Kobayashi, *et al.*, 1988).

### **3.12 CONSIDERACIONES LEGALES**

#### **3.12.1 Decreto 638 Normas sobre Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica.**

Este decreto tiene por objeto establecer las normas para el mejoramiento de la calidad del aire y la prevención y control de la contaminación atmosférica producida por fuentes fijas y móviles capaces de generar emisiones gaseosas y partículas.

A los efectos de estas normas se establecen límites de calidad de aire para los siguientes contaminantes de la atmósfera (ver Tabla 12).

**Tabla 12. Limite permisible de los contaminantes del aire.**

Contaminante	Límite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje excedencia en lapso de muestreo	Periodo de medición (horas)
Dióxido de Azufre	80	50%	24
	200	5%	24
	250	2%	24
	365	0,50%	24
Partículas totales suspendidas	75	50%	24
	150	5%	24
	200	2%	24
	260	0,50%	24
Monóxido de Carbono	10.000	50%	8
	40.000	0,50%	8
Dióxido de Nitrógeno	100	50%	24
	300	5%	24
Sulfuro de Hidrógeno	20	0,50%	24

Fuente: Decreto N° 638, (1995).

Se establece la siguiente clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones de Partículas Totales Suspendidas (PTS), calculadas en base a promedios anuales (ver Tabla 13).

**Tabla 13. Clasificación de zonas según los rangos de concentraciones PTS.**

Partículas $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Zonas
< 75	Aire limpio
75-200	Aire moderadamente contaminado
201-300	Aire altamente contaminado
> 300	Aire muy contaminado

Fuente: Decreto N° 638, (1995).

La evaluación de la calidad del aire, en un área determinada, se llevará a cabo durante lapsos de muestreo que comprendan variaciones climatológicas y estacionales, si las hubiera, y considerando los tipos y características de las fuentes de emisión mas importantes del sector, ciclos de operación representativos de la producción promedio anual de las fuentes, así como cualquier otra condición del área que pueda incidir en la calidad del aire. Este lapso de muestreo comprenderá un tiempo mínimo de cuatro (4) semanas, una cantidad mínima de veinte (20) muestras efectivas, distribuidas durante todo el lapso de muestreo, con una frecuencia mínima de captación de una (1) muestra cada tres (3) días, para estudios que se realicen en un lapso menor de seis (6) meses y con una frecuencia mínima de una (1) muestra cada seis (6) días, para estudios efectuados en lapsos mayores de seis (6) meses. Asimismo, los períodos de medición reflejarán las variaciones diurnas y nocturnas y los valores máximos, para los casos de mediciones continuas. El número de puntos de muestreo y su ubicación deberá permitir que se detecten las variaciones de concentración debido a las fuentes existentes. En todo caso, la localización de las estaciones de muestreo será fuera del lindero de cualquier fuente.

La actividad de explotación de minas de carbón es denominada fuente fija y se someterán a la aplicación de este Decreto. El MARNR, a solicitud de parte interesada, podrá otorgar constancias de cumplimiento de la normativa ambiental en materia de emisiones, a aquellas actividades inscritas en el registro que hayan presentado la caracterización correspondiente, con resultados satisfactorios, y a quienes hayan cumplido con su proceso de adecuación.

### **3.12.2 Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos**

Esta Ley tiene por objeto regular la generación, uso, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de las sustancias, materiales y desechos peligrosos, así como cualquier otra operación que los involucre con el fin de proteger la salud y el ambiente.

Se prohíbe la descarga de sustancias, materiales o desechos peligrosos en el suelo, en el subsuelo, en los cuerpos de agua o al aire, en contravención con la reglamentación técnica que regula la materia. A los efectos de esta Ley, las sustancias, materiales y desechos peligrosos se clasifican de acuerdo con los Sistemas de la Organización de Naciones Unidas. Esta clasificación podrá ser actualizada cuando se requiera tomando en consideración los avances tecnológicos y la caracterización de estas sustancias, materiales y desechos por las organizaciones especializadas, tanto nacionales como internacionales.

Toda persona natural o jurídica, pública o privada que posea, genere, use o maneje sustancias, materiales o desechos peligrosos, incluso aquellas sustancias, materiales o desechos que pudieran ser contaminantes persistentes o que pudieran ser capaces de agotar la capa de ozono deben cumplir con las disposiciones de esta Ley y con la reglamentación técnica que regula la materia.

Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas responsables de la generación, uso y manejo de sustancias, materiales o desechos peligrosos están obligadas a:

1. Utilizar las sustancias y materiales peligrosos de manera segura a fin de impedir daños a la salud y al ambiente.
2. Desarrollar y utilizar tecnologías limpias o ambientalmente seguras, aplicadas bajo principios de prevención que minimicen la generación de desechos, así como establecer sistemas de administración y manejo que permitan reducir al mínimo los riesgos a la salud y al ambiente.
3. Aprovechar los materiales peligrosos recuperables permitiendo su venta a terceros, previa aprobación por parte del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, por medio de reutilización, reciclaje, recuperación o cualquier otra acción dirigida a obtener materiales reutilizables o energía.
4. Disponer de planes de emergencia y de contingencia, diseñados e implementados de conformidad con la reglamentación técnica sobre la materia.

5. Disponer de los equipos, herramientas y demás medios adecuados para la prevención y el control de accidentes producidos por sustancias, materiales o desechos peligrosos, así como para la reparación de los daños causados por tales accidentes.
6. Constituir garantías suficientes y asumir los costos de cualquier daño que se pueda producir como consecuencia del manejo de las sustancias, los materiales o desechos peligrosos, incluyendo los derivados de los diagnósticos, que permitan cuantificar los daños causados por el accidente.
7. Permitir el acceso a los sitios o instalaciones y prestar facilidades y equipos de seguridad a los organismos competentes para realizar labores de inspección y control.

El Estado apoyará e incentivará las acciones de las personas naturales o jurídicas que conlleven a la recuperación de los materiales peligrosos recuperables y a la adecuada disposición final de los desechos peligrosos, así como el desarrollo de aquellas tecnologías que conduzcan a la optimización de los procesos y la minimización de la generación de desechos peligrosos mediante incentivos económicos o fiscales, siempre que se mejoren los parámetros de calidad ambiental establecidos en la reglamentación técnica a fin de minimizar los riesgos a la salud y al ambiente. La recuperación y disposición final de los desechos peligrosos son una responsabilidad compartida del Estado y los particulares.

Toda persona natural o jurídica, pública o privada que genere, maneje o tenga conocimiento o información de un incidente o accidente con sustancias, materiales o desechos peligrosos está en la obligación de notificarlo a los organismos competentes.

## **CAPÍTULO IV. RECONOCIMIENTO EN CAMPO**

En esta sección del informe se presenta la descripción del reconocimiento visual de la fosa Baqueta y del proceso de combustión espontánea en diferentes localidades de los mantos de carbón. También se detalla la recolección de muestras de carbón provenientes de los mantos 4O, 5O, 6M y 7M. Se presentan las ubicaciones de los sitios con fumarolas y cuáles son las características más resaltantes que fueron observadas y que caracterizan la combustión espontánea en mina Paso Diablo.

### **4.1 SELECCIÓN DE SITIOS DE OBSERVACIÓN EN FOSA BAQUETA**

Para seleccionar las zonas a ser estudiadas en la fosa Baqueta, fue necesario hacer un estudio descriptivo del área, es decir, se tuvo que permanecer por varias semanas observando el comportamiento de la fosa, así como cualquier irregularidad observada en los puntos calientes o fumarolas, ya establecidas en la zona. También en aquellos sitios potenciales donde se produjeran nuevas fumarolas.

Esta observación se hizo de manera continua, se estuvo semanalmente en la zona. Se trató de estar a tempranas horas en la zona, para permanecer en el sitio hasta casi la hora de partida de la mina, entre 9 am y 3 pm.

En estas observaciones se realizaron varias medidas térmicas, en las zonas donde lo permitía la topografía, así como también medidas de emisión de gases, color, olor de los gases, etc. Las zonas de las cuales se escribe en esta sección, se pueden ver en el mapa anexo B.

**Día 21/11/04                      Hora: 11:00 am**

**Zona 1:** Nivel 100 msnm, Zona perimetral Sur.

- Se visualiza una gran fumarola, con humos de color gris.
- Presencia de tubería de agua que riega la zona.
- Presencia de fuertes vientos.
- Olores muy fuertes, parecidos a “huevos podridos”.

- Temperatura ambiental entre 30-35°C.
- Por medio de dos medidores de gases, Micro Pac Drager® CO y H<sub>2</sub>S, se obtuvieron los siguientes valores: 15, 16, 14, 12, 21 ppm, para el CO, y 2, 4, 3, 1, 4 ppm, para el H<sub>2</sub>S. Estos valores están dentro de los límites permisibles del Decreto 638.
- Por medio de una pistola térmica, se obtuvieron los siguientes resultados: 100, 95, 85, 83, 80°C.
- Por medio de una cuadrícula se determinó la tasa de avance de la combustión, que estuvo entre 0,5 a 1 m<sup>2</sup>/día.

**Zona 2:** Nivel -36 msnm, hacia el Norte en el piso del grupo 6.

- Pequeño punto caliente, con presencia de gases de color gris.
- Olores no tan fuertes.
- Material húmedo, debido a llovizna.
- Condiciones climáticas iguales a la zona anterior.
- Vientos no tan fuertes, por estar dentro de la fosa.
- No se marcó ninguna medida de gases.
- Las temperaturas de la superficie, estuvieron por el orden de los 75°C.

**Zona 3:** Nivel -24 msnm, hacia el Este en el piso del grupo 8.

- Se observa un comienzo de combustión, pero todavía no se logra ver nada preciso.

**Día 23/11/04                      Hora: 1:20 pm**

**Zona 1: Idem.**

- Condiciones idénticas a las del día 21/11/04.
- Comienza una pequeña llovizna en la fosa, a las 2:30pm, en el nivel -36.
- Temperatura ambiental entre 25-30°C.
- Presencia de fuertes vientos.



**Zona 2: Idem.**

- Mismas condiciones que el día 21/11/04.
- Los mismos olores a pesar de que hay mucho viento.

**Zona 3: Idem.**

- Proceso de combustión activo.
- Presencia de muchos gases de colores amarillo y gris.
- Fuertes vientos.
- Valores de temperatura, en los alrededores del foco, entre los 90 y 110°C. No se pudieron hacer medidas directamente ya que había maquinaria pesada removiendo el material en combustión.
- Medidas de gases, CO y H<sub>2</sub>S, entre 25 y 30 y entre 2 y 5 ppm, respectivamente.

**Zona 4:** Nivel -24 msnm, Pared Oeste techo del grupo 4.

- Comienzo de autocalentamiento, podría ser debido a las lluvias.
- Olores fuertes a “huevos podridos”.
- Gases de color gris claro.
- Temperaturas superficiales, por el orden de los 70-90°C.

**Día 25/11/04                    Hora: 2:00 pm**

- No hay cambio en ninguna de las zonas.
- Condiciones climáticas frescas, con temperatura ambiental de 25-30°C.
- Presencia de viento.

**Día 5/12/04                    Hora: 10:00 am**

**Zona 1: Idem.**

- Permanece exactamente igual.
- Sólo se observa un patrón de seguimiento de la combustión, a través de la pendiente de la topografía.
- Continúa el riego de agua por medio de tanque y tuberías.

**Zona 2 y 3: Idem.**

- Se mantienen estables, debido a la remoción del material en el caso de ambas zonas.
- Se observan pequeñas cantidades de emisión de gases, seguramente debido al apagamiento.
- Temperaturas superficiales muy bajas, no se logró captar con la pistola.

**Zona 5:** Nivel -48 msnm, Pared Este de la laguna de sedimentación.

- Nueva presencia de pequeña emisión de gases, posiblemente una mínima fumarola de algún material que quedó destapado.
- Gases de color gris claro.
- No se pudieron realizar medidas térmicas o de gases, debido a lo complejo del acceso al área.

**Zona 4: Idem.**

- Se produce una fumarola en la zona.
- Gases de color gris oscuro.
- Palas removiendo material caliente.
- Temperaturas superficiales entre los 80-95°C.
- El monitoreo de gases es parecido a las demás medidas.

**Día 7/12/04**

**Hora: 1:00 pm**

**En general**

- En la mañana hubo mucha lluvia y no se pudo ir a campo.
- En la tarde, la Zona 1 aumentó su emisión de gases.
- El color de los gases era de un gris muy oscuro.
- En las zonas 4 y 5 se incrementó el proceso de autocombustión.
- El clima estuvo fresco, con amenazas de lluvia. Temperatura ambiental de  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ .
- Las medidas de temperaturas subieron en las respectivas zonas, acerca de un 5%.

- Las medidas de los gases permaneció igual.

**Día 12/12/04                    Hora: 1:00 pm**

**En general**

- Sólo se visualizaron tres zonas en combustión, las zonas 1, 4 y 5.
- No hubo presencia de lluvia.
- Temperatura ambiental entre 25-30°C.
- Color de los gases gris claro.
- Presencia de fuerte olor a “huevos podridos”.
- Presencia de fuerte viento.

**Día 14/12/04                    Hora: 8:10 am**

- Se producen fuertes lluvias en varias zonas de la mina.
- Imposible traslado a campo.

**Hora 10:00 am**

- Ida a campo.

**Zona 1: Idem**

- Continúa su progreso de autocombustión en las adyacencias del área.
- Mucha presencia de gases, color gris claro.
- Temperatura ambiental por 20-25°C.
- Medición de temperaturas superficiales; exactamente las mismas que las tomadas anteriormente.
- El monitoreo de gases fue de, CO: 20; 22; 24; 25 ppm y para H<sub>2</sub>S, fue: 4; 5; 4; 3 ppm.

**Zona 4: Idem**

- Se tuvo llovizna suave.
- Se extendió el área de combustión.
- Gases de color gris claro.
- Olor de los gases ácido y de azufre.
- Mediciones de temperatura superficial entre los 80-90°C.

- La emisión de gases, CO y H<sub>2</sub>S, estuvo igual en la zona 1.

**Día 3/01/05                      Hora: 9:34 am**

**En general**

- La zona 1 sigue totalmente igual.
- Temperatura ambiental de 35°C.
- Presencia de nuevo punto caliente.
- La zona 4 permanece muy estable, próxima a apagarse.

**Zona 6:** Nivel 48 msnm, Pared Norte de la fosa Baqueta.

- Olores de gases muy suaves, prácticamente no se siente.
- No se pudo realizar medidas de temperatura o de emisión de gases, debido a lo complejo del acceso al área.
- Color de los gases, gris claro.

**Día 10/01/05                      Hora 1:30 pm**

**En general**

- La zona 5 ya se apagó totalmente, no se observa más emisión de gas.
- La zona 1 sigue continuamente emanando gases. Igual que en los días anteriores.
- Temperatura ambiental entre 30-35°C. Día muy caluroso.
- La zona 6, continúa su proceso de autocalentamiento. No se observó ninguna característica específica.
- No se puede alcanzar a medir temperaturas ni emisión de gases.
- Olores de gases a “huevos podridos”.

**Día 19/01/05                      Hora: 1:00 pm**

- La zona 1 continúa exactamente igual que los días anteriores. El único cambio es que ha abarcado mayor área.
- Temperatura ambiental entre 30-35°C.
- Presencia de fuerte viento.

### **Zona 6: Idem**

- Área totalmente en combustión, presencia de llamas.
- Debido a lo complejo de su acceso, no se puede remover el material quemado.
- Presencia de gases muy grises y olores a “huevos podridos” y ácidos.
- Por la ubicación del punto caliente, es muy probable que su comportamiento sea muy parecido al de la zona 1, es decir, que se forma la autocombustión en dirección de la pendiente, si no se toman las medidas correctivas adecuadas.

Las fotos a continuación muestran imágenes (figuras 15-23) de la fosa minera con fumarolas en donde se aprecian, con un poco más de detalle, algunas de las características descritas anteriormente:



**Figura 15. Imagen mostrando zona perimetral Sur, donde observamos la autocombustión de la Zona 1**

**Fuente: Elaboración Propia, (21/11/04).**



**Figura 16. Imagen mostrando la zona 1, donde se observa como ha abarcado mayor área hacia la pendiente.**

**Fuente: Elaboración Propia, (10/01/05)**



**Figura 17. Imagen del nivel -36 (zona 2), hacia el Norte del grupo 6. Se observa como se remueve el material en llamas.**

**Fuente: Elaboración Propia, (30/11/04)**



**Figura 18. Imagen donde se observa la zona 3, cerca de la pared Este.  
Fuente: Elaboración Propia, (02/12/04).**



**Figura 19. Imagen en donde se aprecia la zona 3. Se tuvo que usar maquinaria pesada para  
remover el material caliente.  
Fuente: Elaboración Propia, (05/12/04)**



**Figura 20. Imagen que muestra la gran emisión de gases de la zona 4, cerca de la pared Oeste.  
Fuente: Elaboración Propia, (14/12/04).**



**Figura 21. Imagen de la zona 4, visto desde la pared Este. El material afectado es el grupo 4.  
Fuente: Elaboración Propia, (19/12/04).**





**Figura 22. Imagen de la zona 5, ubicada en la pared Este de la laguna de sedimentación. Se observa un pequeño punto caliente.  
Fuente: Elaboración Propia, (05/01/05).**



**Figura 23. Imagen de la zona 5, se observa en proceso de apagamiento.  
Fuente: Elaboración Propia, (12/01/05).**

## **4.2 TOMA DE MUESTRAS DE CARBÓN**

Las muestras de mineral de carbón utilizadas en este trabajo fueron tomadas en los mantos 4O, 5O, 6M y 7M, directamente en la fosa Baqueta. Las muestras 4O y 5O fueron tomadas de la pared Norte, al nivel 12 msnm. Las muestras 6M y 7M, fueron recogidas de sus respectivos pisos, al nivel 0 msnm.

Las muestras de carbón de la mina fueron aproximadamente unos diez (10) kg de cada manto, los cuales fueron cuarteados y homogeneizados para poder obtener una muestra representativa de los mantos.

### **4.2.1 Metodología de la Toma de Muestras de Carbón**

La metodología empleada para la toma de muestras fue la del Método de Canales Sistemáticos.

A.- Requerimientos del método.

- a) Delimitación longitudinal del área donde se procede a hacer los canales.
- b) Distancia entre canales consecutivos y número de canales necesarios.
- c) Altura vertical necesaria.
- d) Ancho requerido.

B.- Procedimiento en campo.

- a) La longitud que se tomó fue de 25 m de acuerdo al manto expuesto.
- b) La distancia entre canales fue de 1 m y el número de canales se calculó de la siguiente forma: distancia longitudinal entre los espaciamientos de los canales, dando un número de canales de 25.
- c) La profundidad se tomó en función de obtener los estratos menos meteorizados, la altura vertical tomada fue de 1,50 m de acuerdo con la topografía del talud.
- d) El ancho tomado fue de 60 cm aproximadamente.

e) Luego se procedió a la extracción de carbón manualmente, las muestras fueron ensacadas en bolsas de polietileno para su traslado hacia la Universidad Central de Venezuela.

### **4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS**

#### **4.3.1 Descripción mineralógica**

Las características mineralógicas del carbón observadas en una muestra de mano son las siguientes:

Dureza: 0,25 a 0,50; según la escala de Mohs

Color: Negro

Brillo: Sedoso a mate, translúcido

Raya: Negra

Fractura: Concoidal

Exfoliación: En lámina basal perfecta

Peso específico: 1,0 a 1,8 gr/cm<sup>3</sup>

#### **4.3.2 Descripción megascópica**

El mineral del carbón proveniente de la fosa Baqueta, mantos 4O, 5O, 6M y 7M, se pueden describir megascópicamente de la siguiente manera:

- 1.- Dimensiones de la muestra de mano: 15 x 5 (largo x ancho), en cm.
- 2.- Polvo: particulado con diámetro de 2 a 6 mm
- 3.- Color: negro
- 4.- Dureza: medianamente friable.
- 5.- Fractura: concoidal
- 6.- Brillo: graso

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA E HIDROGEOOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

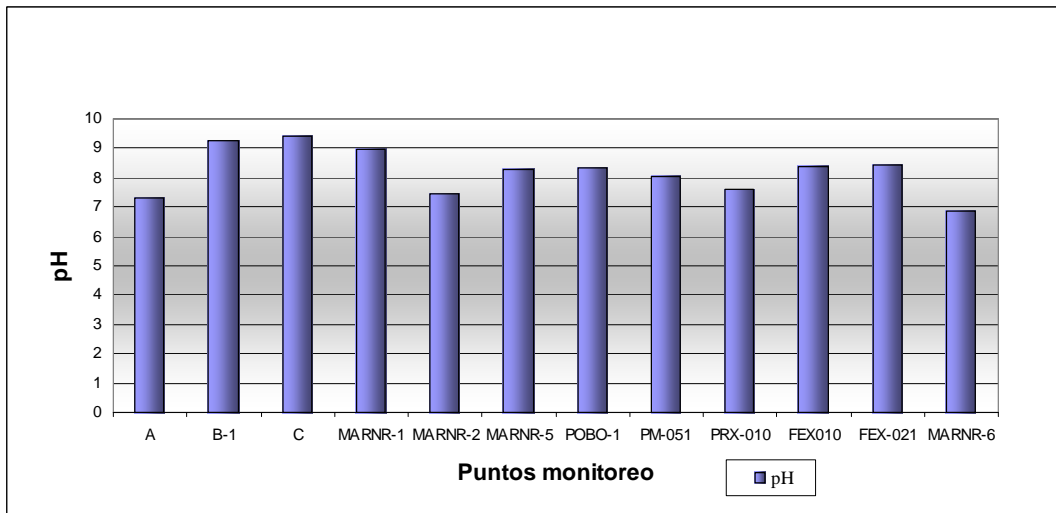
Para el cumplimiento de la gestión de esta caracterización se tomó muy en cuenta un programa de control ambiental el cual se trabajó en función de recomendaciones ofrecidas a partir de un diagnóstico ambiental realizado por el MARN, LUZ, MEM (hoy Ministerio de Industrias Básicas y Minería, MIBAN), por profesionales y en cumplimiento de las condiciones de los permisos otorgados por el MARNR y de Normas Ambientales Nacionales.

##### **4.4.1 Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas.**

Se realiza mediante convenio entre CDG-SA con MARN. Consiste en la medición mensual de los niveles estáticos de las aguas de pozos distribuidos en el área de influencia de la mina. Incluye además el aforo mensual del caño Paso Diablo en cuatro puntos diferentes, y la captación trimestral de muestras de agua para análisis físico-químico y biológico de diez pozos ubicados estratégicamente, así como en los cuatro puntos de aforos del caño, para correlacionar resultados con los de los pozos. Este programa comenzó en julio de 1989 y hasta la fecha los registros son manejados estadísticamente por el Departamento de Ambiente de CDG-SA.

Como obras de mitigación se han construido dos lagunas de sedimentación, un dique sedimentador (en construcción) y red de drenaje (por toda la fosa), haciendo que las aguas en su escurrimiento superficial fluyan hacia el *Pit* de Mina, para luego ser bombeadas a las lagunas.

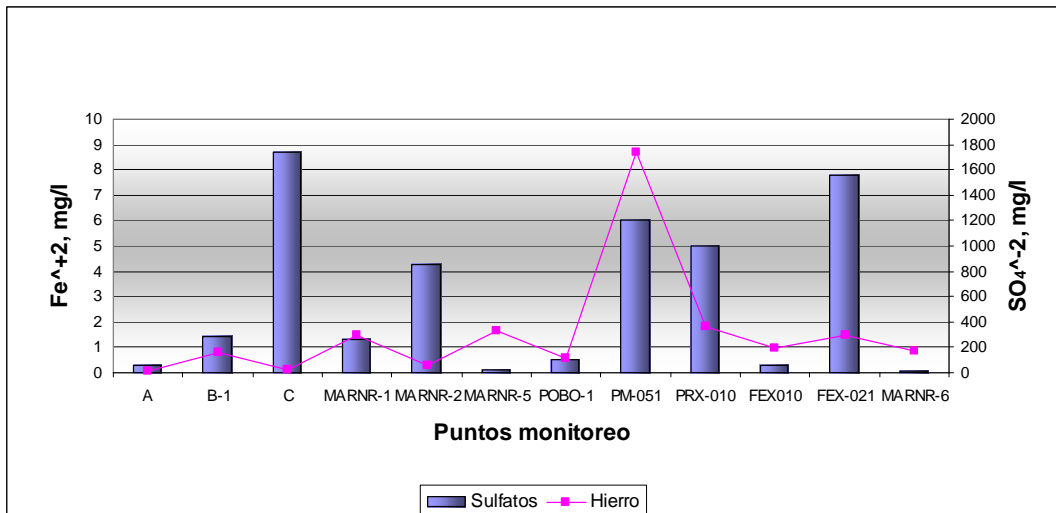
A continuación se muestran las figuras (24-26) donde se presentan los parámetros más importantes, para el estudio, obtenidos de los distintos análisis de las aguas superficiales y subterráneas. Los sitios de medición se muestran en mayor detalle en el mapa anexo C. Las tablas donde se muestran los resultados de los análisis de calidad de agua se detallan en el anexo D.



**Figura 24. Concentración pH del agua subterránea y superficial, medidos en los diferentes puntos.**

**Fuente: Elaboración propia con datos del Occidental Lab, C.A. (2004).**

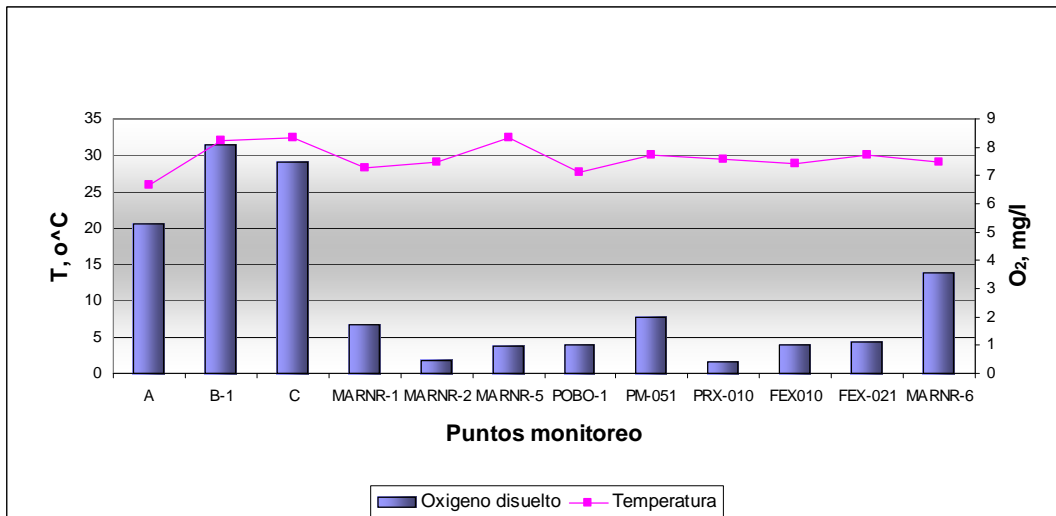
Como muestra la figura 24, se puede observar que los valores obtenidos de pH están por el orden de 7 a 10, es decir, los valores de pH inferiores a 7, indican aguas ácidas que favorecen el carácter corrosivo del agua, es decir, produce el debilitamiento de la pared de la conducción al eliminarse la misma. Los valores de pH mayores a 7,5 indican aguas con tendencias incrustantes, es decir, es un proceso de depositación de minerales sobre la superficie interna del material en donde se transporta el agua. Con esto determinamos que las aguas subterráneas en la fosa Baqueta, son incrustantes, dando como consecuencia una reducción en el diámetro efectivo de conducción, que se traduce en una disminución del caudal del agua y en un aumento de la presión interna, que termina finalmente por fracturar el manto de carbón. También se puede observar que en cuerpos de aguas subterráneas, la acidez es causada principalmente por el  $\text{CO}_2$  y en algunos casos, por ácidos minerales del tipo  $\text{H}_2\text{S}$  o por la presencia en el agua de sales fuertes provenientes de bases débiles, (Ácidos Conjugados). Esto demuestra que las aguas subterráneas de la Mina Paso Diablo no tienen gran contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , por no ser aguas de concentración ácida.



**Figura 25. Relación de contenido de sulfatos e hierro en las aguas subterráneas y superficiales. Fuente: Elaboración propia con datos del Occidental Lab, C.A. (2004).**

Como se muestra en la figura 25, el sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) y el hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) se distribuyen ampliamente en la naturaleza y puede presentarse en aguas naturales en concentraciones que van de unos pocos a varios miles de miligramos por litro. Los residuos del drenado de minas, pueden aportar grandes cantidades de sulfato y hierro debido a la oxidación de la pirita. Se observa que hay puntos donde el contenido de sulfato y hierro es elevado, dando a entender que existe contenido de pirita en los mantos de carbón adyacentes al punto, aunque no existe un límite o rango de concentración de sulfatos que indique la presencia de pirita.

Concentraciones de hierro, mayores a 0,5 ppm indican posible formación de incrustaciones debidas a la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro causando así depositación de minerales en los mantos de carbón, elevando así la presión interna y formándose la autooxidación del carbón, por medio del ingreso de aire por las fracturas en el manto. También se concluye que estas precipitaciones de óxidos elevan aún más la temperatura produciendo así más calor y promoviendo a la autocombustión del carbón.



**Figura 26. Relación del contenido de oxígeno disuelto y la temperatura de las aguas subterráneas y superficiales.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos del Occidental Lab, C.A. (2004).**

Como muestra la figura 26, el oxígeno disuelto proviene de la mezcla del agua con el aire ocasionada por el viento y, en la mayoría de los casos, principalmente del oxígeno que liberan las plantas acuáticas en sus procesos de fotosíntesis. La solubilidad del oxígeno como la de cualquier otro gas en el agua, depende de la presión atmosférica imperante en cada sitio, de la temperatura media del cuerpo de agua y de su contenido en sales disueltas. En términos generales, la solubilidad del  $O_2$  en el agua es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura y a la concentración de sales disueltas.

La dependencia de la temperatura en la solubilidad de un gas puede observarse en hechos cotidianos tales como el de hervir agua en un recipiente, mediante el burbujeo que se desprende conforme va subiendo la temperatura. Esto se refiere a aquellos puntos donde la temperatura del agua sea elevada, calentando la misma logrando en algunos casos que hierva, permitiendo así la solubilidad del oxígeno disuelto y creando mas vapor de agua, promoviendo a la autocombustión del carbón.

#### **4.4.2 Monitoreo de la calidad del aire.**

También aprobado por el MARNR se realiza el monitoreo de particulado sólido total en suspensión en tres sitios de la mina Paso Diablo y en cinco sitios de Santa Cruz de Mara. El programa incluye para la mina Paso Diablo muestreo cada seis días de acuerdo a convenios y contratos con consultoras privadas y registradas en el MARN.

Para Santa Cruz de Mara el monitoreo se realiza por convenio MARNR-CDG-SA. Las muestras son recolectadas cada seis días durante todo el año y se contempla análisis de contenido de carbón en los filtros del equipo muestreador (*Hi-Vol*).

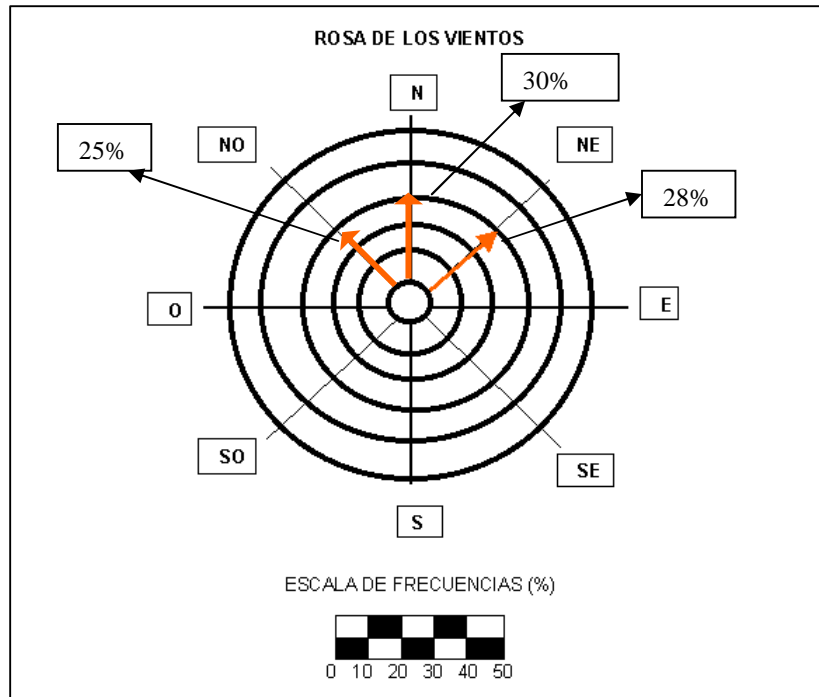
A continuación se mostrarán las figuras (27-31) mostrando las diferentes características, más relevantes para nuestro estudio, medidas en el aire muestreado en las estaciones indicadas de la mina, Carichuano y El Carbón. Estas estaciones están indicadas en más detalle en el mapa del anexo C, de igual forma en el anexo E se muestran en detalle las tablas de resultados de los análisis de calidad de aire.

El viento es un elemento climatológico definido como "el aire en movimiento" y se describe por dos características: la velocidad y la dirección.

Debido a esto es que se considera un vector con magnitud (dada por la velocidad) y dirección. Los meteorólogos crearon una gráfica denominada Rosa de los Vientos que permite representar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento, de las muestras recolectadas en los sitios de la mina Paso Diablo.

Como se muestra en la figura 27, en la estación Carichuano se puede observar que los vientos tienen dirección predominante hacia el Norte. Pero con variaciones hacia el Este y Oeste, esto es importante para los talud Norte y Este y Oeste, ya que tienen que estar totalmente sellados para evitar la entrada de los vientos.





**Figura 27. Rosa de los vientos de la estación Carichuano. Se establece relación entre la velocidad y la dirección de los vientos.**

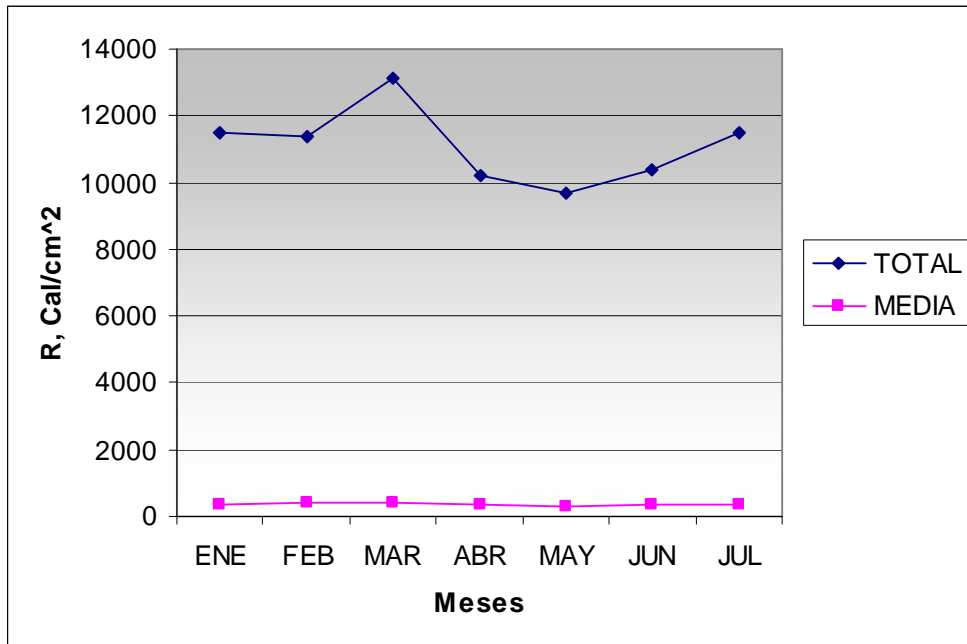
**Fuente: Elaboración propia con datos del MARN, (2004).**

Es sumamente importante tener conocimiento de esta dirección y velocidad del viento, para evitar futuros problemas en las zonas donde se presente corredores de fallas.

Como muestra la figura 28, la radiación directa y difusa media está en un rango de 300 a 400 cal/cm<sup>2</sup>, y es muy parecida en el transcurso del año. Este valor indica que los mantos de carbón reciben un calor externo que puede ayudar a iniciar el proceso de combustión espontánea en aquellos sitios donde ya haya comenzado el proceso de combustión.

Este es un factor que no es controlable, por lo tanto hay que tener las previsiones necesarias, para evitar que la radiación eleve la temperatura en los mantos de carbón. Esto se puede evitar manteniendo los mantos sellados (como se explicará en las recomendaciones), evitando los rayos del sol, y en los casos de las pilas de

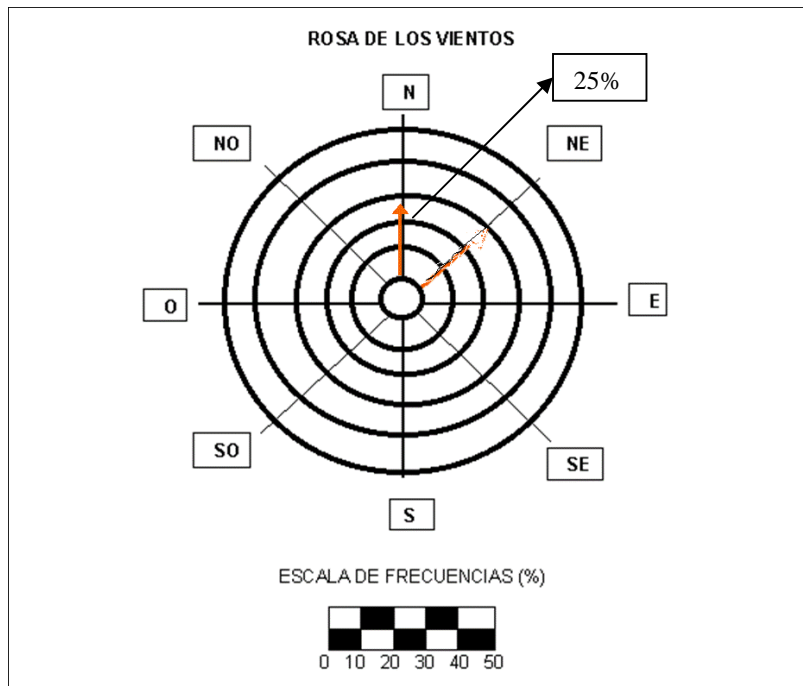
almacenamiento se debe mantener húmedo el carbón para evitar futuros autocalentamientos.



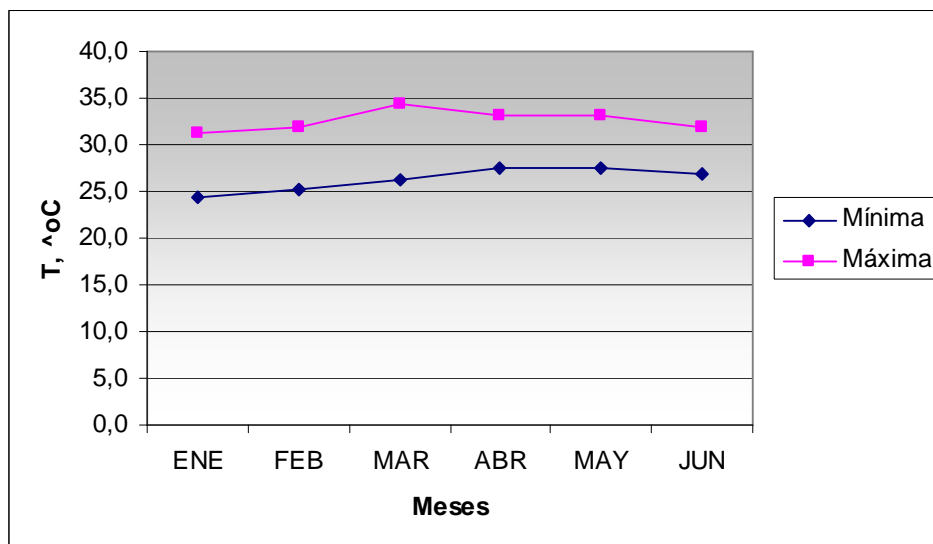
**Figura 28. Medida total y media de la radiación directa y difusa de los rayos solares, en la estación Carichuano.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos del MARN, (2004).**

Como se muestra en la figura 29, en la estación El Carbón los vientos tienen una dirección predominante hacia el Norte y con una velocidad máxima, igual que la estación Carichuano, de 20 a 25 km/h.

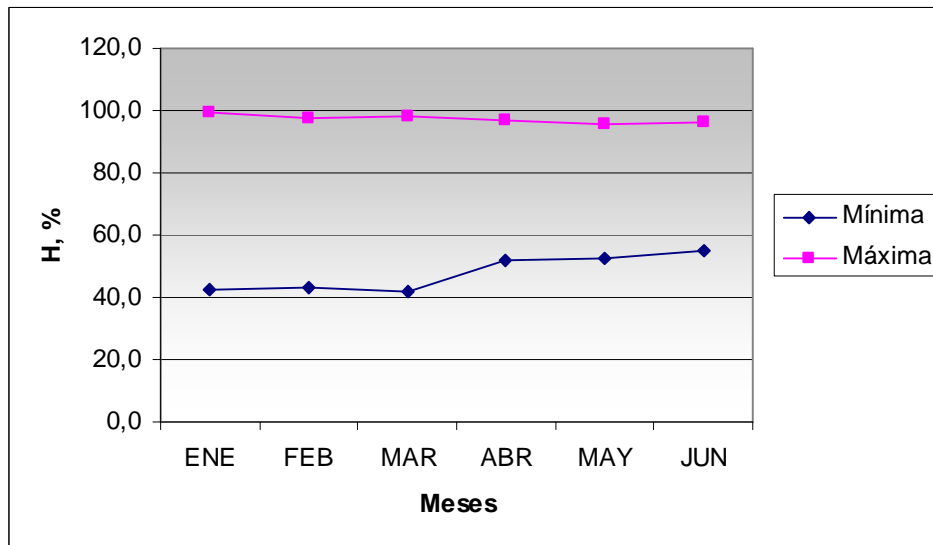
Como se muestra en la figura 30, la temperatura del ambiente también juega un papel importante a la hora de promover la combustión espontánea del carbón. La temperatura está en el rango de 25 a 35 °C, esto indica que es elevada y es muy probable que ayude a avanzar el proceso de combustión espontánea si se diera el caso.



**Figura 29. Rosa de los vientos de la estación El Carbón. Se establece relación entre las velocidades y las temperaturas.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos del MARN, (2004).**



**Figura 30. Relación de temperaturas máximas y mínimas del ambiente, en la estación El Carbón.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos del MARN, (2004).**



**Figura 31. Contenido de humedad relativa del aire. Medida en la estación El Carbón.**  
Fuente: Elaboración propia con datos del MARN.

Como se muestra en la figura 31, se observa que la humedad relativa puede llegar a valores de 100%, es decir un aire completamente saturado de vapor de agua. Esto conjuntamente con las altas temperaturas hace que el aire sea denso y se mantenga a ras con el suelo, siendo así más fácil el contacto con los mantos. Por otra parte, esta humedad es sumamente peligrosa, cuando se percola por las aberturas de los mantos, debido a que produce cambios muy bruscos en el contenido de humedad del carbón, promoviendo de tal forma al autocalentamiento del carbón.

La propagación del fuego es de acuerdo a la forma y orientación del valle, y a la dirección predominante del aire, debido al embudo de las corrientes de aire. Pequeñas fisuras se extienden hacia la superficie, formándose paralelo al contorno y desarrollándose, en respuesta a la liberación de presión, a través de un sistema de fracturas existentes. Zonas no contiguas de combustión ocurren a lo largo de la longitud del fuego. Al calentar el sol al carbón y las capas de aire inmediatas al suelo, el viento caliente extrae humedad de ellos y eleva la temperatura hasta el punto en que puede predisponerse fácilmente la ignición.

Notables gases tóxicos incluidos:

- Dióxido de Sulfuro  $\text{SO}_2$ ,
- Oxido de Nitrógeno  $\text{NO}_x$ ,
- Sulfuros de Hidrógeno  $\text{H}_2\text{S}$ , y
- Monóxido de Carbono  $\text{CO}$ .

De las cuales los dos últimos son también inflamables.

Los gases que son más probables de estar presente durante un calentamiento y que son inflamables son:

- Metano  $\text{CH}_4$ ,
- Hidrógeno  $\text{H}_2$ , y
- Monóxido de Carbono  $\text{CO}$ ,
- Etano  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,

Un gran número de otros hidrocarburos son también probables que se produzcan. Estos usualmente están presentes en muy pequeñas cantidades, tanto que es improbable que alcancen niveles tóxicos y tienen un efecto insignificante dentro de los límites explosivos de la atmósfera. Sin embargo, estos contribuyen a los olores distintivos de los humos de alquitrán (fenoles) que están asociados con las primeras etapas del calentamiento y pueden ser detectadas en muy bajas concentraciones por instrumentos de monitoreo de gases. Los fuegos de pequeña escala pueden ser extinguidos o controlados por una total inundación con agua o removiendo el material en llamas.

Hay que tener precaución cuando se elimine el fuego de combustión espontánea con agua debido que hay un potencial de reacción peligrosa entre el agua y el carbón caliente. En esfuerzos para controlar un calentamiento, rociando o inyectando agua, es posible que se produzca vapor de agua. El vapor de agua es una

mezcla de CO e H<sub>2</sub>, ambos altamente inflamables, y se produce una reacción entre el carbón caliente y el agua.

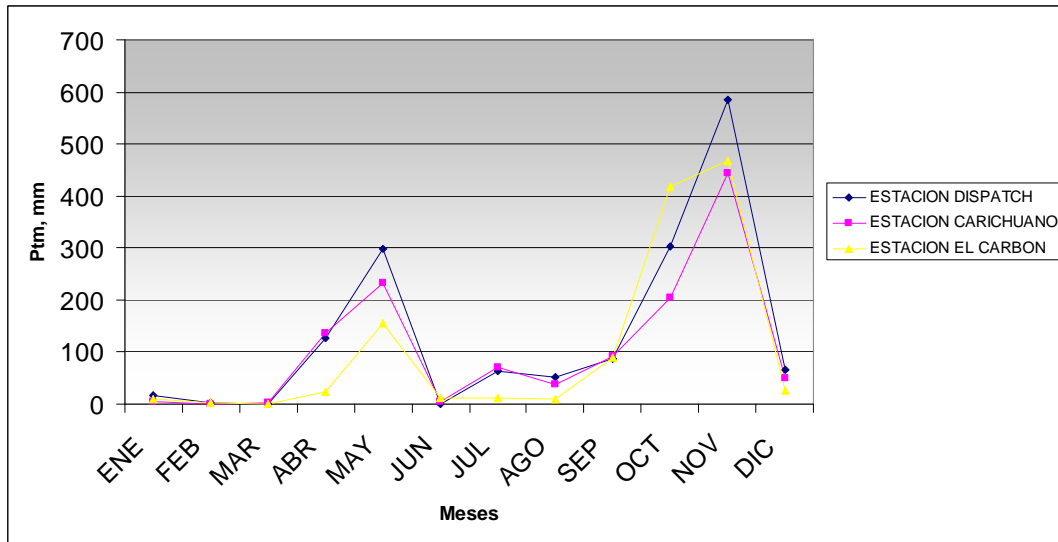
Debido a lo ancho de los límites explosivos del vapor de agua (de 4% a 74%), la alta naturaleza tóxica del CO y la presencia de una fuente de ignición, se debe evitar en lo posible la producción de vapor de agua. La situación se torna más peligrosa debido a los grandes volúmenes de gas y vapor asociados explosivamente, producto de la reacción líquido-sólido. Por estas razones el agua debe ser sólo usada para controlar un calentamiento, si el mismo puede ser inundado hasta apagarse rápidamente, limitando la cantidad de vapor de agua producida y excluyendo el aire.

#### **4.4.3 Monitoreo de precipitaciones**

En la actualidad existen tres estaciones meteorológicas, Dispath, Carichuano y El Carbón, en donde se miden las precipitaciones diarias ocurridas en el transcurso de un día completo, es decir, continuamente están midiendo para así obtener un patrón de lluvias, y tomar en cuenta los meses que hay que tener más precaución de lluvias torrenciales.

A continuación se muestran las figuras (32-33) con mediciones en las diferentes estaciones. Estas estaciones están indicadas en más detalle en el mapa del anexo C, de igual manera las tablas están detalladas en el anexo F.

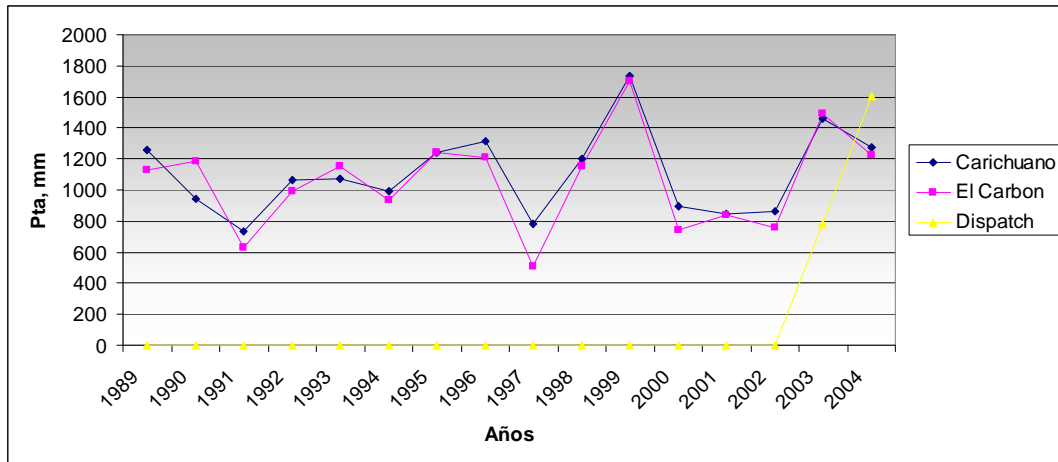
Se puede observar en la figura 32 que en toda el área de la fosa Baqueta, existe una similitud en las precipitaciones. Siendo un poco más bajo en la estación El Carbón, esto se debe a la altitud y zona donde se encuentra esta estación. Es sumamente importante tomar en cuenta que entre los meses de Abril a Junio y Septiembre a mediados de Noviembre, existen fuertes lluvias diariamente. Este factor es incontrolable, pero se puede predecir, con ayuda de estas mediciones.



**Figura 32. Precipitaciones correspondientes al año 2004.**  
**Fuente: Elaboración propia con datos de CDG-SA.**

Hay que prevenir este tipo de situaciones para evitar que el agua haga contacto con los mantos y se percolen, promoviendo así al cambio de humedad y por consiguiente al autocalentamiento del carbón. Es difícil de evitar el ingreso del agua en los mantos o en las pilas de almacenamiento, pero se puede hacer que esas aguas drenen y no se queden atrapadas, ya que al terminar la lluvia y comience el sol, las temperaturas se elevan y el agua que está acumulada se irá evaporando produciendo vapor de agua, la cual produce mucho calor y por lo tanto se inicia el autocalentamiento del carbón.

Se puede observar en la figura 33 que a través de los años han ido aumentando las precipitaciones, esto se debe a los cambios climáticos que han estado ocurriendo en el planeta. Se debe continuar con estas mediciones en los siguientes años, para observar que cambios se producen y estar prevenidos para evitar la combustión espontánea del carbón.



**Figura 33. Precipitaciones totales anuales, correspondiente al periodo de 1989 hasta 2004.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

También se puede ver que no existe un patron de comportamiento de las lluvias a través de los años. Pero tomando en cuenta el pico del año 1999, contribuye a pensar que en los próximos años existirán precipitaciones más frecuentes e intensas, con lo que se debe proceder a supervisar la fosa y sellar los mantos para evitar los posibles cambios de humedad.

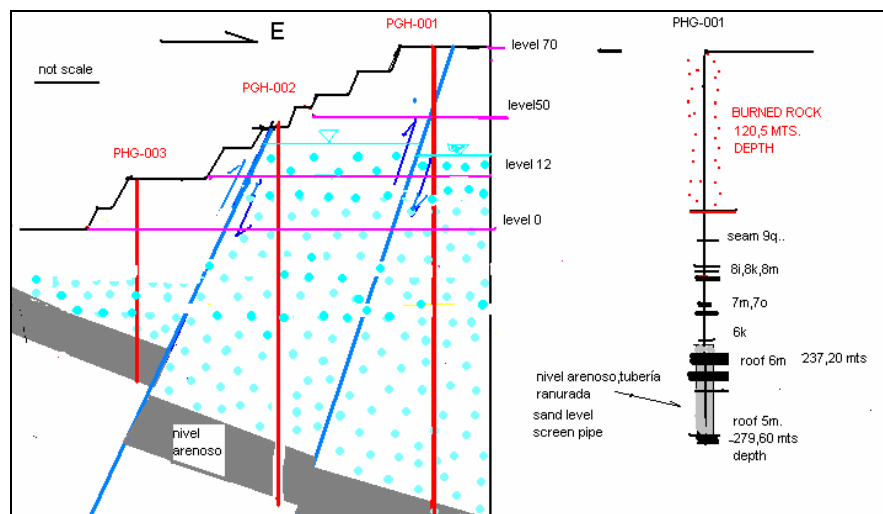
#### **4.5 MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA CON PIEZÓMETROS**

Al Departamento de Geología ha sido incorporada una nueva función que es el monitoreo constante de los 6 piezómetros instalados en la pared límite Este de la mina. De esta manera se tiene un control de los niveles de agua, debido a que éstas ejercen presión sobre la pared, esto podría traer consecuencias lamentables que interrumpirían eventualmente la actividad en la mina.

Se tiene previsto drenar esta agua mediante el método de despresurización pasiva y activa. La despresurización pasiva se realiza perforando inclinadamente con un ángulo de 45° hasta llegar al acuífero y el agua fluiría por gravedad debido a la presión que ejercen los estratos sobre ellas.

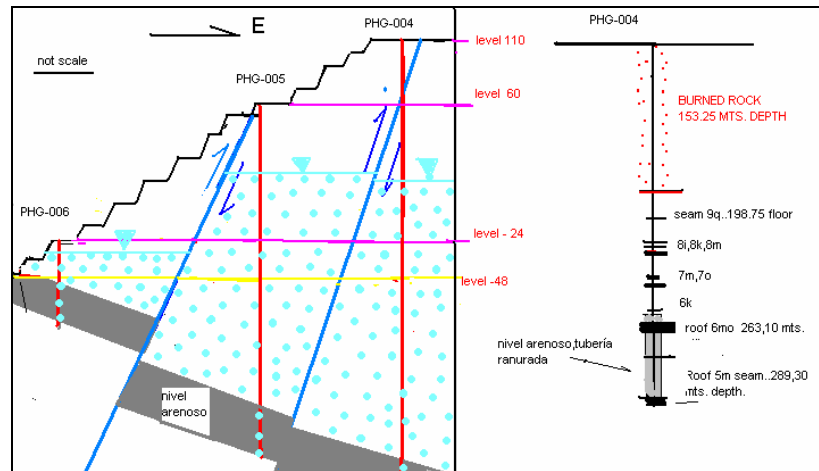


La despresurización activa se realizará en la parte alta de la pared, mediante una perforación vertical hasta llegar al acuífero, pero con la diferencia que el agua será llevada a superficie con la ayuda de bombas sumergibles, este proceso permitirá restarle presión a la pared dándole mayor estabilidad y garantizando una operación más segura dentro de la mina.



**Figura 34. Ubicación de los piezómetros PGH-001, PGH-002 y PHG-003**  
**Fuente: CDG-SA, (2000).**

En la figura 34 se observa la pared Este de la fosa Baqueta y los respectivos tres primeros piezómetros. Aquí se puede determinar la altura en donde se encuentra el nivel de agua, y también se observa el corredor de fallas. También se observa una sección en el piezómetro PHG-001, donde se puede ver la cantidad de roca quemada y techos y pisos de los mantos.



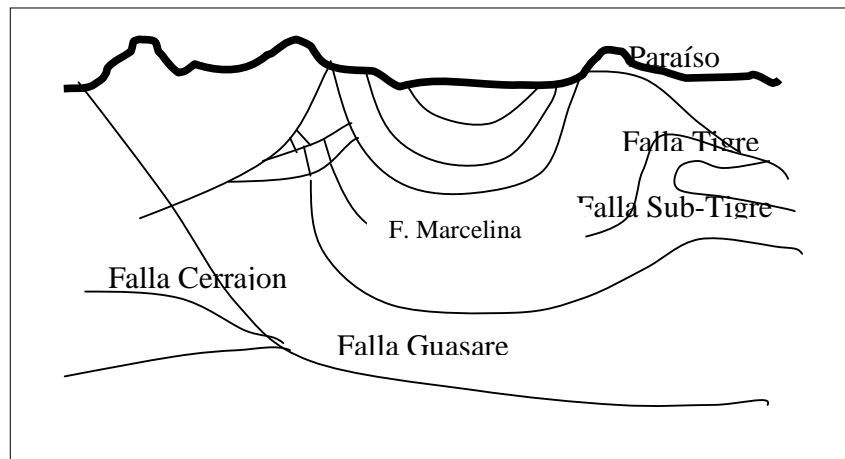
**Figura 35. Ubicación de los piezómetros PHG-004, PHG-005 y PHG-006.**  
**Fuente: CDG-SA, (2000).**

En la figura 35, se observa que el nivel del agua está más bajo que en la figura anterior, también se nota que existe mayor material de roca quemada, es decir, que esta zona ha sufrido muchos procesos de combustión espontánea. Es importante la medición de estos parámetros para proceder al drenaje de las aguas y así evitar daños futuros, tanto a la pared de la mina como a los mantos de carbón.

#### **4.6 CONSIDERACIONES GEOESTRUCTURALES EN LA FOSA BAQUETA**

Estructuralmente, la sierra de Perijá es considerada como un levantamiento alargado entre la depresión del lago de Maracaibo y los valles de los ríos Cesar y Ranchería, en Colombia. La misma ha sido afectada por una serie de fallas y plegamientos en sentido longitudinal, meridional y transversal. La dirección predominante que siguen estas fallas es Norte – Sur, hasta la altura de Machiques, siguiendo luego la dirección Suroeste – Noreste, hasta llegar al río Palmar. Esta falla consiste en una verdadera faja de líneas de rupturas paralelas entre sí y en forma de escalones, originándose de esta forma una sucesión de bloques levantados y hundidos, individualizados y definidos en el paisaje (ver Figura 36).

Específicamente, en la fosa Baqueta existen fallas normales e inversas con rumbos N-S y N45W y de buzamiento de 45°E y W, siendo algunas de éstas verticales. Estas fallas, reciben denominaciones como: A, D, J, B y O, como se describió en el Capítulo I sobre Consideraciones Geológicas.



**Figura 36. Corte Geológico del Sinclinal de Manuelote**  
**Fuente: Informe de Carbozulía, S.A, (1998).**

Para tener una mejor perspectiva de la zona de Baqueta, se realizaron varias secciones a lo largo del área, comenzando por la parte Sur de la fosa hasta llegar a la pared Norte, donde se encuentra el límite de la fosa minera (ver Figura 37).

Hay que tomar en cuenta que éstas estructuras del macizo rocoso ya existían y al excavar la roca y descomprimir los terrenos ocurren desequilibrios y reactivación del movimiento del agua en el subsuelo, es decir, el flujo lateral por las paredes y el flujo del viento por las caras de las paredes donde aflora el carbón. Estos son factores controlables ya que al realizar estos trabajos de remoción de material se puede evitar el contacto del aire y del agua con los mantos de carbón, por medio de un sellante natural o químico y así prevenir la combustión espontánea del carbón.

Estas secciones se hicieron con la finalidad de conocer tanto la cantidad de material de carbón, que se encuentra en el subsuelo, así como también aquellas estructuras geológicas que caracterizan el área donde se excava la fosa minera. También se puede observar si existe algún flujo de agua, que corre entre los mantos de carbón, o por la sobrecarga. A continuación se muestran las distintas secciones con sus diferentes ubicaciones en planta (ver Figuras 38-42). Las secciones 2-5 no se presentan porque no contienen mantos de carbón, debido a que ya fueron minados.

En el anexo G se puede observar con más detalle las diferentes ubicaciones de las secciones que se realizaron en la fosa Baqueta, así como también en el anexo H se puede detallar cada una de las secciones, mostrando la complejidad de las fallas y los mantos que se encuentran en el subsuelo.

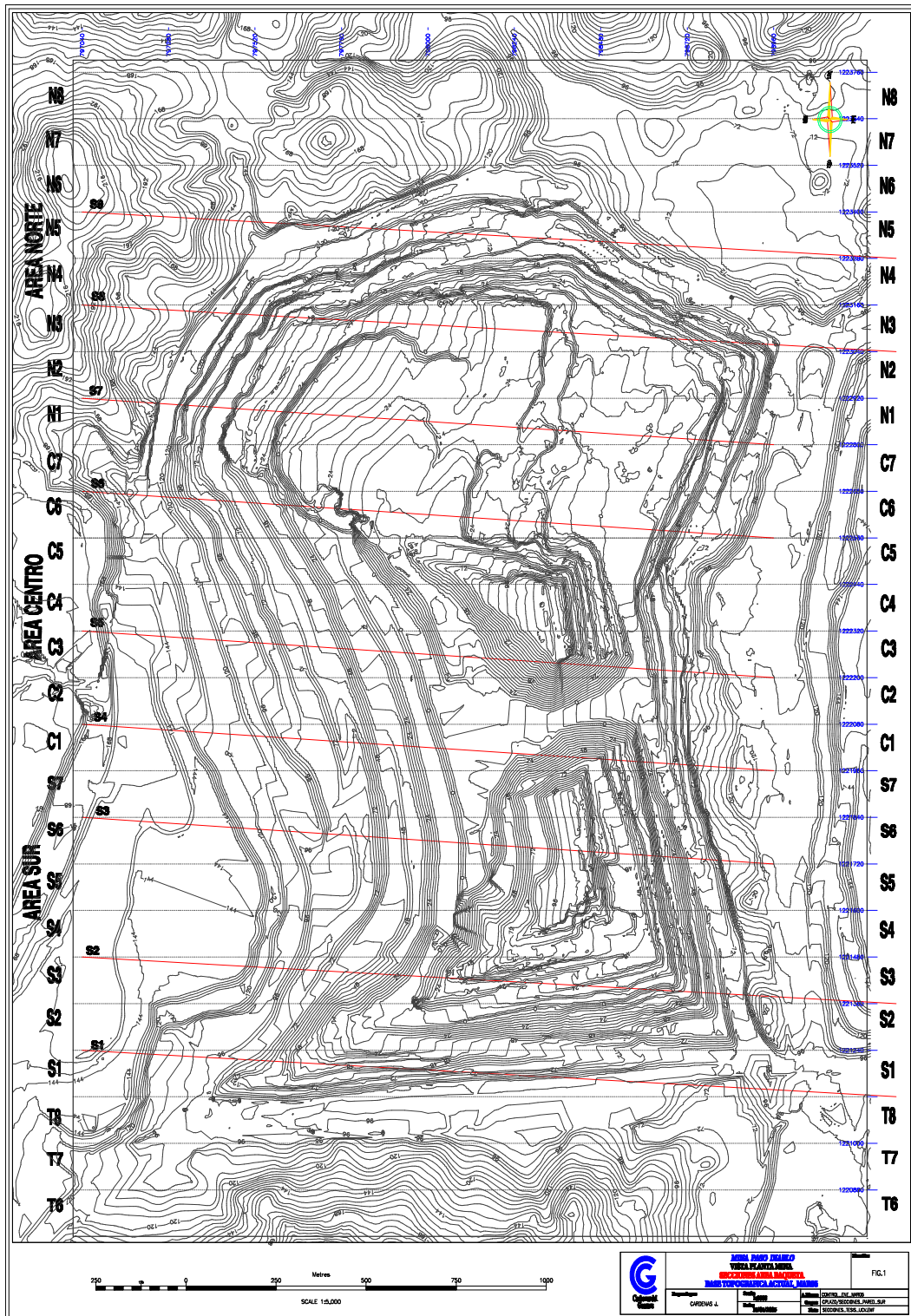
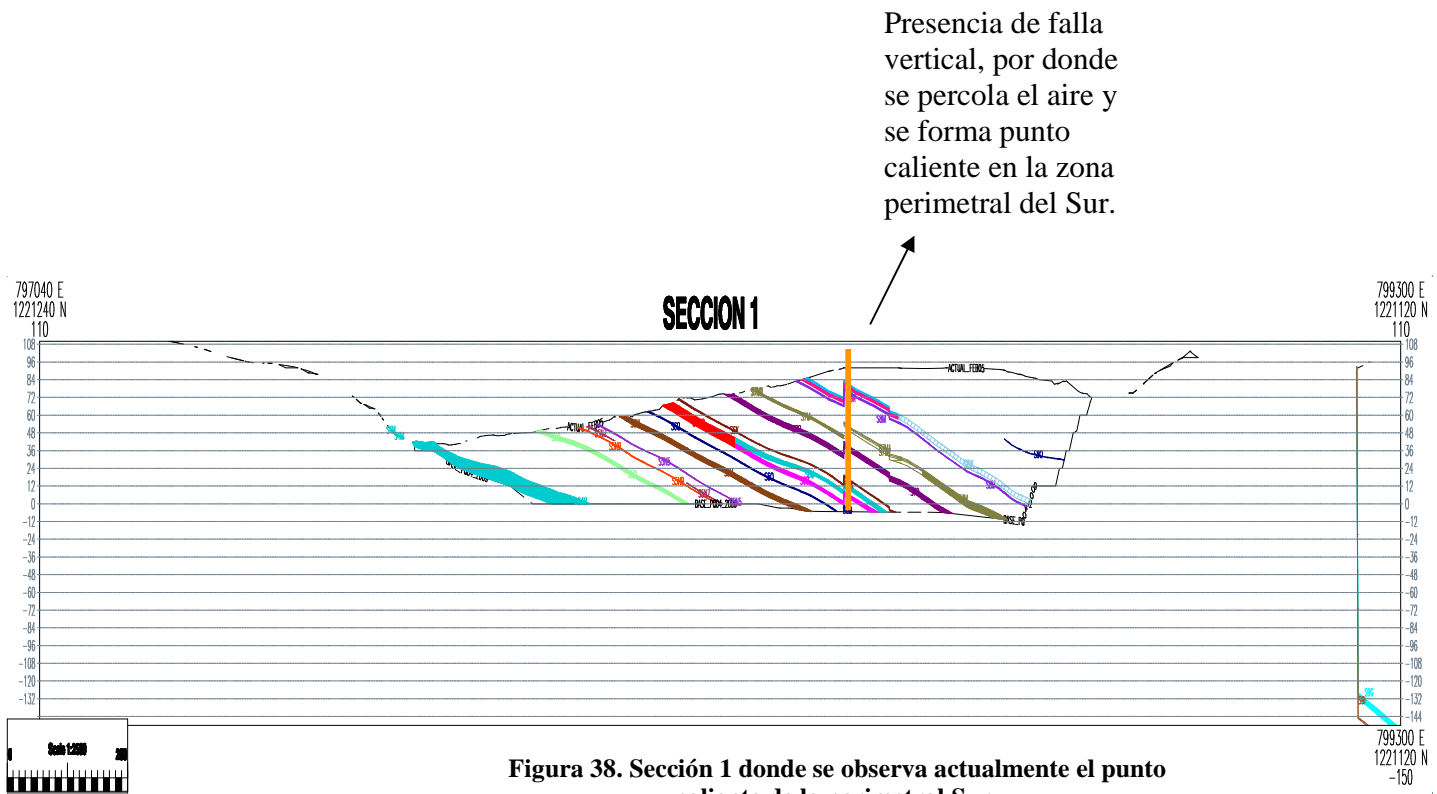
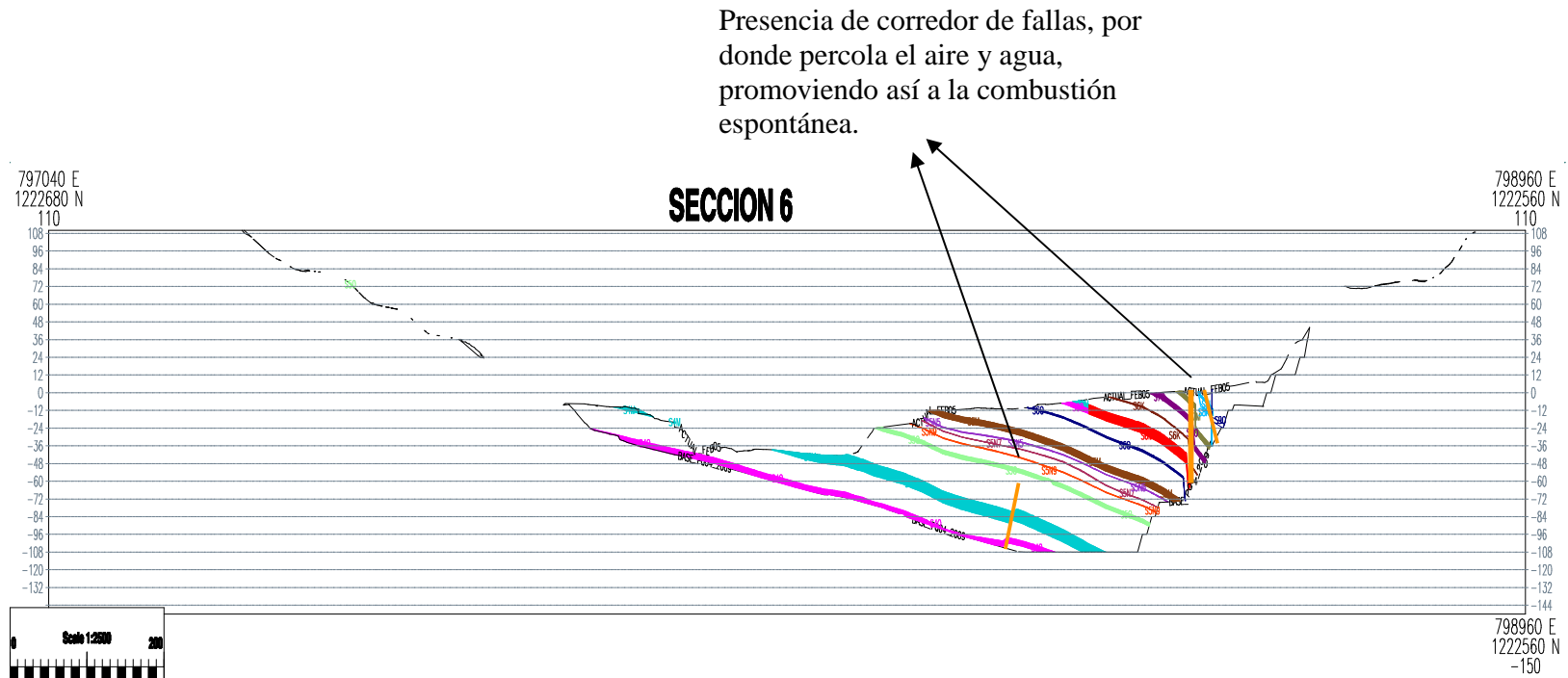


Figura 37. Mapa de la fosa Baqueta donde se muestran las secciones geotécnicas.  
 Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 38. Sección 1 donde se observa actualmente el punto caliente de la perimetral Sur.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 39. Sección 6 donde aparece corredor de fallas. Se observa como atraviesan los mantos de carbón.**  
Fuente: Elaboración propia.

Zona donde se ha presentado punto caliente, debido a la presencia de las fallas y otros factores que influyen. Obsérvese como las fallas atraviesan todos los mantos.

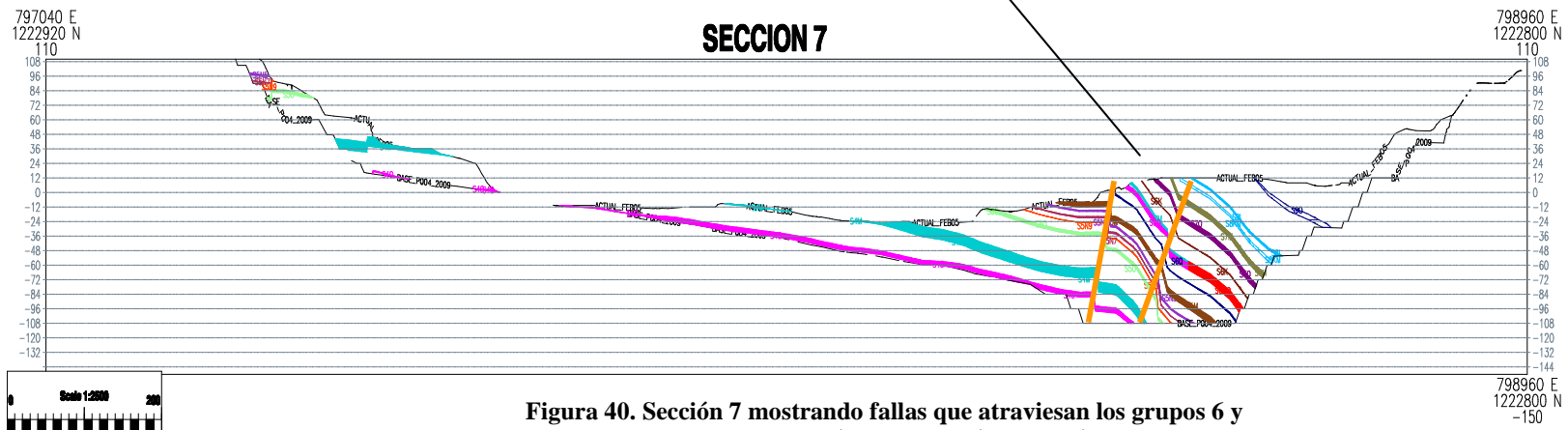
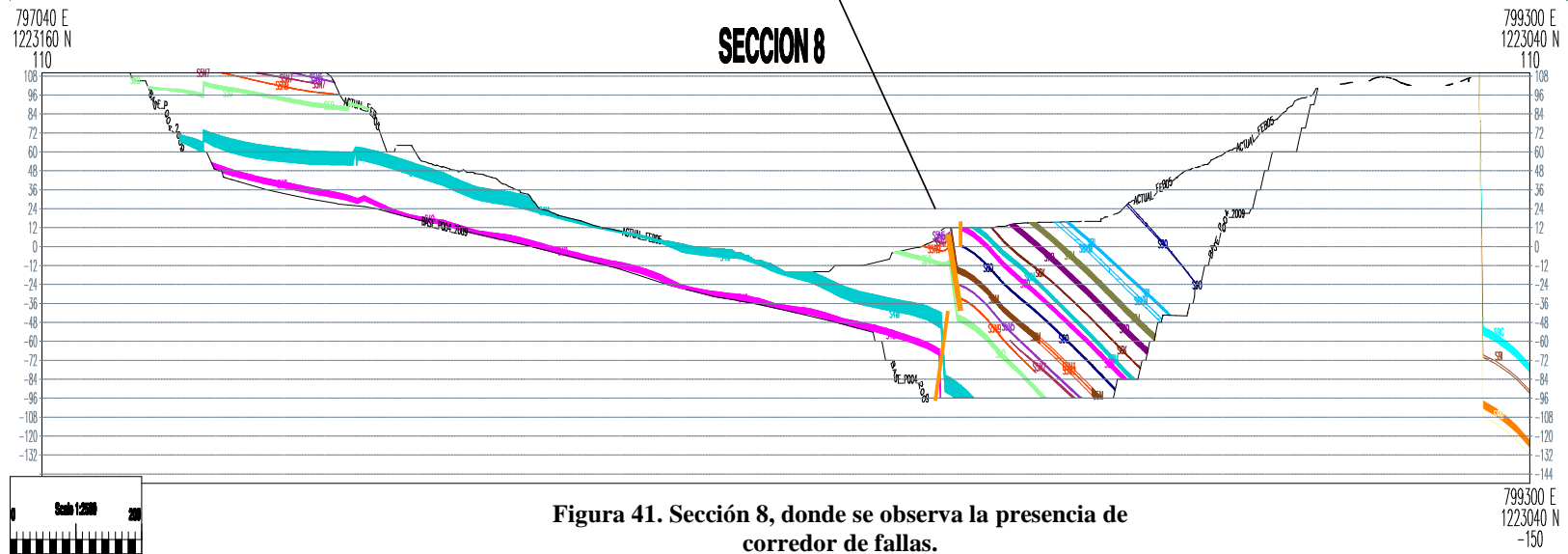


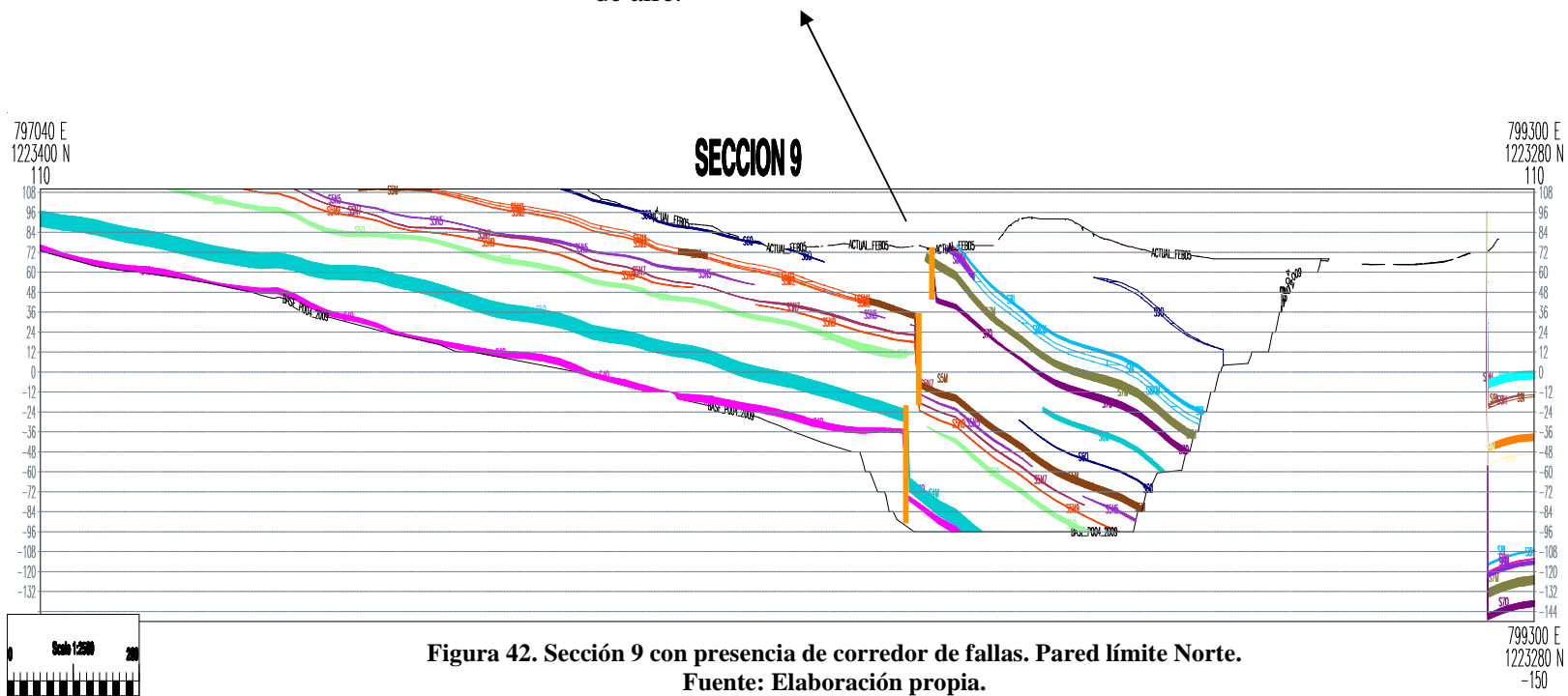
Figura 40. Sección 7 mostrando fallas que atraviesan los grupos 6 y 7. Promoviendo así la combustión espontánea.  
Fuente: Elaboración propia.



Presencia de corredor de fallas, zona sumamente propensa a percolación de aire dentro de los mantos. Ubicada cercana a la pared límite Norte.



Presencia de corredor de fallas, en forma de escalera. Continúa la posibilidad de entrada de aire a los mantos. Hay que tomar en cuenta este factor y sellar el paso de aire.





## **CAPÍTULO V. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN**

En esta sección se presentan los procedimientos para los análisis de laboratorio. Se ofrece una explicación acerca del modo de obtención de los resultados. Estos análisis se realizan para conocer las características fisicoquímicas de las muestras de carbón obtenidas de los mantos donde se produce normalmente la combustión espontánea.

El carbón mineral no presenta una composición uniforme, por lo tanto, no puede ser representado por una fórmula química definida. Básicamente, la caracterización del carbón mineral se puede realizar por dos tipos diferentes de análisis químicos: el análisis inmediato y el análisis elemental.

El carbón mineral se puede comparar entre sí y/o con otros combustibles por sus especificaciones propias, siendo importante el conocimiento de estas propiedades y las correlaciones existentes.

### **5.1 ANÁLISIS INMEDIATO DEL CARBÓN**

El análisis inmediato abarca la determinación de los principales componentes de un carbón mineral y sus proporciones en peso. Su importancia está relacionada con la clasificación de los carbones, caracterización del combustible para aplicación industrial, como también a efectos comparativos entre alternativas energéticas (Instituto Nacional del Carbón (INCAR), 2003).

En el análisis inmediato se evalúan las siguientes características: humedad inherente, contenido de cenizas, contenido de materia volátil y carbono fijo. En este caso, existe la combinación de tres determinaciones (humedad, cenizas y materia volátil) en el laboratorio y una cuarta calculada por diferencia (carbono fijo) (Instituto Nacional del Carbón (INCAR), 2003).

### **5.1.1 Contenido de Humedad Inherente**

La cantidad total de agua presente en una muestra de carbón mineral es resultante de la combinación entre la humedad superficial y la inherente al carbón. Durante las etapas de refinado, transporte y almacenamiento existe la incorporación de agua superficial. El excedente de agua es resultado de las propiedades naturales del producto. En este caso, el agua surge en forma de combinación química, incluso en la matriz porosa del carbón mineral.

El concepto de humedad total comprendido en el análisis de muestras de carbón mineral presenta dificultades de determinación, así como también sus resultados pueden variar y distinguirse dependiendo de la metodología del análisis. Existen varios tipos de humedad que se explican a continuación:

- a) Humedad superficial: agua agregada a la superficie externa del carbón, derivada del manejo y/o agentes externos;
- b) Humedad residual o inherente: agua retenida en los poros del carbón;
- c) Humedad total: suma de la humedad superficial y residual o inherente;
- d) Humedad de análisis o de higroscopía: agua absorbida por el carbón durante su manipulación para el análisis fisicoquímico.

Para los estudios sobre el desempeño del carbón mineral como energético, se debe considerar que la cantidad total de agua contenida en el carbón mineral se debe evaporar cuando se produce la combustión, acarreado, por lo tanto, una pérdida de calor y una disminución del rendimiento térmico.

### **5.1.2 Contenido de Cenizas**

Durante la formación geológica de los yacimientos de carbón, diversas impurezas minerales se adhieren a la matriz carbonosa inicial. Las procedencias de estos materiales se deben a las litologías adyacentes, a la combinación entre

materiales orgánicos o inorgánicos de los restos vegetales que dieron origen al yacimiento y al propio carbón mineral y su génesis de formación.

La presencia de cenizas en el carbón mineral trae consigo la reducción de su poder calorífico. Los carbones presentan varias posibilidades de refinado para una reducción considerable de los contenidos de ceniza. Sin embargo, estos resultados se reflejan directamente en el costo final del producto obtenido. En este caso, las relaciones entre el contenido de cenizas, el poder calorífico y el costo de extracción del producto comercial poseen relación directa.

### **5.1.3 Contenido de Materia Volátil**

La materia volátil existente en el carbón mineral es el resultado de las combinaciones de carbono, hidrógeno y otros gases. Entre las variables del proceso afectadas directamente por el contenido de materia volátil, se encuentran el tamaño de la llama y la estabilidad de la combustión.

En principio, es de esperar un aumento en el poder calorífico por el mayor tenor de volátiles hasta un contenido del 20%. Por encima de estos valores se produce una disminución en el poder calorífico, y esto se debe al hecho de que parte de los volátiles son formados por combinaciones de oxígeno y de nitrógeno no combustibles.

### **5.1.4 Contenido de Carbono Fijo**

El carbono fijo es la fracción residual del carbón mineral, descontados los contenidos de cenizas, humedad y materia volátil. A continuación se muestra la ecuación en la cual se calcula el porcentaje de carbono fijo.

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - \% \text{ Cenizas} - \% \text{ Humedad} - \% \text{ Materia Volátil}$$

## 5.2 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible se expresa por la cantidad de calor producido en la combustión por unidad de masa de este producto. Normalmente, se expresa en Kcal/Kg. Su cálculo se puede efectuar a través de una bomba calorimétrica. Posee una gran importancia para la correcta utilización del carbón mineral como combustible.

La evaluación consiste en una muestra de carbón mineral pulverizado y comprimido en forma de pastilla, después se efectúa su ignición en una atmósfera con oxígeno a través de la chispa de un filamento conductor. En el caso de las bombas calorimétricas, los productos resultantes de la combustión del carbón disminuyen con la temperatura ambiente y el vapor de agua formado se condensa suministrando calor latente de condensación para el agua de la bomba. Por lo tanto el valor del calor se mide por el incremento en la temperatura del agua (°C).

Dentro del concepto de poder calorífico existen dos variaciones:

- a) Poder calorífico superior (PCS): Como resultantes del proceso de combustión se tiene la producción de cenizas, gases de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y considerando también la formación de vapor de agua condensado.
- b) Poder calorífico inferior (PCI): Considera la producción de las mismas sustancias que en la definición anterior, aunque toda el agua producida se encuentra en estado de vapor.

## 5.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL CARBÓN

El análisis elemental sirve para la determinación de los elementos individuales de un carbón mineral. Engloba la determinación de las proporciones de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cenizas y la estimación del oxígeno por diferencia. Los elementos evaluados en el análisis elemental son aquellos que pueden sufrir gasificación y liberar o absorber calor durante las etapas de las reacciones de combustión. El carbono, principal responsable por el proceso de

combustión, está presente en el carbón mineral tanto en la materia carbonosa, como en los minerales carbonatados de las cenizas. La cantidad total de carbono es resultante de la suma entre los contenidos de carbono fijo y de carbono presente en las materias volátiles.

La determinación del análisis elemental de carbones minerales engloba una serie de metodologías para su evaluación. En el caso de análisis instrumentales se emplea el equipamiento LECO CHN 600® donde la estimación se efectúa vía combustión de las muestras con localización de los elementos por radiación infrarroja y conductividad térmica.

Para la preparación de las muestras se procede de la siguiente manera:

1.- Se toma una muestra de 25 – 30 kg. Si se trata de una muestra de canal o de pila, ésta es reducida de tamaño en una trituradora de martillos

2.- Luego, la muestra es pasada a través de un cuarteador tipo Jones, para homogeneizarla y obtener porciones iguales. Después es mezclada y pulverizada en un pulverizador de discos para recoger 2 kg que sean representativos de la misma, de los cuales 1.500 gr forman parte del depósito y 500 gr serán tratados en la fase siguiente.

3.- Los 500 gr de muestra son pasados nuevamente por el cuarteador para obtener 100 gr representativos de los 2 kg anteriores. A esta muestra de carbón se le determina el porcentaje de humedad residual, previo secado a 40<sup>0</sup>C durante 4 horas, aproximadamente, a temperatura constante para evitar que la muestra disminuya su poder calorífico.

4.- Las muestras pulverizadas en la fase anterior son llevadas al horno, donde se les realizan los análisis correspondientes para determinar los porcentajes de:



Humedad Residual: se realiza según la normativa ASTM D3173. Se toma una muestra de 1 gr de carbón, se coloca en una estufa a 100°C, aproximadamente, por 1 hora. Luego se introduce en un desecador por 5 min. Se vuelve a pesar. La diferencia de peso corresponde al contenido de humedad que poseía la muestra.

Ceniza Rápida: se toman 0,4kg de muestra y se somete a 720°C por media hora. Se coloca en un desecador y luego se pesa. El ensayo se hace por duplicado.

Ceniza Real: se realiza según la norma ASTM D3174. Se toma una muestra de 1 gr de carbón y se quema en un horno a 750°C aproximadamente, por cuatro horas. El porcentaje de ceniza real se determina con base en la cantidad de muestra analizada.

Poder Calorífico: Se realiza según norma ASTM D3286; usando una bomba calorimétrica isoperbólica.

Azufre: Se realiza según la norma ASTM D3177; se toma una muestra de ½ gr. Se utiliza el método de alta temperatura, en el cual se somete a la muestra a una temperatura de 1.270°C, durante 6 ½ min. Luego se titula usando rojo de metilo al 2% como indicador. Se admite un error de  $\pm 0,02$ .

Material Volátil: Se realiza según la norma ASTM D3175; se toma una muestra de 1 gr. Se somete la muestra a una temperatura de 900°C alrededor de 7 min.

*Fusibilidad del Carbón:* se realiza según la norma ASTM D1857; se hace para muestras de carbón que serán usadas como coque. Consiste en determinar la temperatura a la cual se funde el carbón.

Para realizar estos ensayos, el laboratorio de Control de Calidad de CDG-SA cuenta con un equipo denominado calorímetro isoperbólico, un analizador de azufre y un horno para volátiles.

## 5.4 ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL CARBÓN

Hay un gran número de sustancias químicas en el mundo y para poder identificar cada una de ellas existen diversos métodos. Algunos de estos métodos consisten en disolver la sustancia, transformándola en iones, y hacerla reaccionar frente a diversos experimentos. En nuestro caso se puede identificar sustancias en estado sólido mediante un método que consiste en combustionar la sustancia y dependiendo del color de la luz que emite es posible reconocerla. Esta luz será de un color definido por una longitud de onda característica de la sustancia, y mediante ésta luz es posible identificar de qué sustancia se trata.

En el ensayo de espectrofotometría de absorción atómica de llama, se calienta la muestra a alta temperatura y se descompone en átomos e iones que absorben o emiten radiación visible, con niveles de energías característicos de los elementos implicados. Estos métodos resultan útiles sobre todo para bajas concentraciones de elementos metálicos, tanto en análisis cualitativos como cuantitativos.

El equipo utilizado para analizar las muestras fue el espectrofotómetro de absorción atómica, equipado con quemadores para uso con llamas de aire-acetileno y monóxido de dinitrógeno-acetileno, lámparas de cátodo hueco o de descarga sin electrodos de los metales que integran esta norma, y con posibilidad de corregir la absorción inespecífica y se encuentra en los laboratorios de química instrumental de la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales, de la Universidad Central de Venezuela.

El ensayo a la llama es un método de laboratorio bien establecido para identificar la presencia de un elemento químico determinado en una muestra. Primero se ajusta la llama de un mechero hasta que sea incolora, después se coloca una pequeña cantidad de la sustancia que se desea analizar en la punta de una varilla limpia, y se introduce la varilla en la llama. Los elementos mostrados dan un color característico a la llama.

Las mediciones de absorbancia se hacen a las longitudes de onda características de cada metal (ver Tabla 14) utilizando corrección de fondo para la absorción inespecífica en los casos que ello fuese necesario.

**Tabla 14. Condiciones instrumentales para medir la cantidad de mineral en una muestra.**

<b>Elemento</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Condiciones de llama</b>
Aluminio (Al)	309,3	N <sub>2</sub> O-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> reductora (roja)
Cadmio (Cd)	228,8	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Cinc (Zn)	213,9	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Cobalto (Co)	240,7	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Cobre (Cu)	324,8	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Cromo (Cr)	357,9	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> reductora (amarilla)
Hierro (Fe)	248,3	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Manganeso (Mn)	279,5	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Molibdeno (Mo)	313,3	N <sub>2</sub> O-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> reductora (roja)
Níquel (Ni)	232,0	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Plata (Ag)	328,1	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)
Plomo (Pb)	283,3	Aire-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> oxidante (azul)

**Fuente: Elaboración Propia.**

## **5.5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO**

El análisis petrográfico de las muestras de carbón de la cuenca carbonífera del Guasare, se realizó en el Laboratorio de Petrología del INZIT-CICASI, con la asesoría del personal técnico del mismo.

### **5.5.1 Componentes del Carbón**

Según la escuela inglesa o de Stopes se distinguen los carbones, en su aspecto megascópico, por los siguientes componentes del carbón segregados más o menos en fajas, y se denominan: vitrinita, fusita, clarita y durita.

A simple vista la Vitrinita constituye fajas horizontales delgadas de hasta 20 mm de espesor. Es un carbón brillante, vítreo o de espejo semejante al azabache, que alterna con bandas más anchas o con otro tipo de carbón.

La Fusita o carbón vegetal mineral, es más fácil de identificar debido a su semejanza con el carbón vegetal común. En muestras manuales la fusita forma cuñas irregulares que yacen sobre los planos de estratificación con ángulos diversos.

La Clarita es un término aplicado a aquellas bandas delgadas o gruesas, distintamente de la vitrinita, y están laminadas. Este tipo de carbón tiene fractura uniforme, con brillo lustroso o brillante.

La Durita es un carbón oscuro caracterizado por su falta de brillo y su aspecto mate terroso, color negro o gris plomo, se presenta en bandas sólidas de textura cerrada. Carece por lo general de estratificación.

El examen microscópico ha llevado a mayor afinación y a la subdivisión de estos términos definidos megascópicamente. Los tipos de carbón son considerados especies de rocas constituidas por macerales (análogos a los minerales de las rocas carbonosas).

### **5.5.2 Proceso de Maceración del Carbón**

El proceso mediante el cual las plantas vegetales, en las turbas, son transformadas en carbón una vez enterrados se conoce con el nombre de

Maceración o proceso metamórfico de la transformación que sufren los elementos orgánicos de la turba, que concurren a la formación del carbón. Proceso que comienza desde el origen de la acumulación de la turba, hasta llegar a su más alto grado de transformación: la antracita. Se entiende entonces, en general por maceración, el proceso fisicoquímico mediante el cual se mantiene en contacto una sustancia sólida con un disolvente líquido a cierta temperatura y presión, durante el cual se extrae de dichas sustancias sólidas, las sustancias solubles, quedando las insolubles para formar el maceral, que es el término que se utiliza para denominar aquellas unidades que aparezcan constituyendo un producto en la escala de rangos del carbón.

Generalmente, es el término que se utiliza en la petrografía del carbón para denominar las unidades petrográficas que se observan en las secciones finas o pulidas bajo el microscopio. El término “Maceral” es comparable en rango al término de “Mineral” que se utiliza en la petrografía de las rocas inorgánicas. Así, “Maceral” es una unidad orgánica que compone la masa del mineral carbón.

Los macerales según los tejidos de las plantas que los originan, pueden ser clasificados de la manera siguiente:

**Macerales cuyo origen es definitivamente debido a tejidos corticales y madera.**- Este grupo incluye:

1.- Vitrinita: Principal maceral del carbón y constituyente primario del carbón brillante. Una muestra pulida presenta a veces una imagen más o menos clara de la estructura del tejido maderero, en este caso se denomina TELINITA. Cuando carece de estructura se denomina COLINITA. La colinita es el medio coloidal que domina en todos los carbones brillantes. Observada con luz transmitida, la vitrinita es translúcida y de un color anaranjado claro u oscuro; bajo la luz reflejada va desde el gris hasta el amarillo blancuzco, dependiendo de la concentración.

2.- Fusinita: Es el maceral hallado en el carbón fósil. Siempre muestra una estructura celular carbonizada y cavidades. Algunas paredes celulares están molidas. Es opaca en secciones finas y blancas cuando se ve bajo luz incidente.

3.- Semi-Fusinita: Una mejor denominación podría ser mero-fusinita. Es el estado de transición a partir de la fusinita y la vitrinita. Su estructura celular no es siempre fácil de reconocer, ya que el poder de reflexión es intermedio entre el de la fusinita y vitrinita.

**Macerales cuyo origen es definitivamente debido a materiales de plantas distintos a los tejidos madereros.-** Este grupo comprende:

1.- Esporonita: Son los residuos fósiles de las paredes de esporas hinchadas paralelamente a la estratificación; normalmente el interior de las esporas puede ser reconocido solo como una banda muy fina. En secciones finas el color es amarillo oro en carbones de bajo rango, e idéntico al de la vitrinita en carbones de alto rango en superficies pulidas, la esporonita tiene mayor reflexión que la vitrinita. Las esporas presentes se pueden subdividir, dependiendo del tamaño, en macroesporas y microesporas.

2.- Cutinita: Un constituyente formado a partir de las cutículas. La apariencia morfológica de estos residuos puede ser claramente distinguible: como bandas más o menos estrechas con franjas de separación. En luz reflejada el color es idéntico al de la esporinita.

3.- Resinita: Residuos fósiles de resinas de plantas y ceras. Este maceral aparece como cuerpo de forma redonda, como inclusión en la colinita y como relleno de las cavidades celulares de la telinita. Bajo luz transmitida es de color amarillo y bajo luz reflejada son oscuros.

4.- Alginita: Residuos de algas y el principal constituyente del carbón “*boghead*”. Este maceral tiene una forma característica. Cuando un espécimen alginita es

examinado bajo aceite en luz incidente, es muy oscuro; en apariencia bajo luz transmitida, el color es amarillo brillante.

5.- Esclerotinita: Residuos de esclerótica del hongo, es opaca y muy reflectiva.

**Macerales cuyo origen no aparece estar relacionado todavía con tejido vegetal.**- Este grupo comprende:

1.- Micrinita: Nombre aplicado a una serie de macerales que constituyen una porción de la fracción atrítica de los mantos del carbón y que se forman por granulación y subsiguiente metamorfosis de materiales derivados de las paredes celulares de las plantas. El material es opaco en secciones finas y blanco en luz incidente.

2.- Macrinita: Nombre aplicado a partículas de diversos orígenes, que son blancos con luz incidente pero no tan altamente reflectiva como la fusinita. Nunca presentan organización celular de las plantas.

Además en ciertos carbones se encuentran pequeños cuerpos de resina, translucidos y rojizos. Los tipos de carbones constan de estos materiales en proporciones variables (ver Tabla 15).

**Tabla 15. Grupo de Macerales**

<b>GRUPO DE MACERALES</b>	<b>MACERALES</b>
Vitrinita	Telinita Colinita
Exinita	Esporinita Cutinita Resinita Alginita
Intertinita	Fusinita Semifusinita Micrinita Esclerotinita

**Fuente: Bonezzi, 1984.**

### **5.5.3 Análisis de Macerales**

Según Escobar y Martínez (1993) la identificación de los macerales liptiníticos llevan al hecho de la necesidad de modificar los métodos analíticos para la medición de la composición macerológica, para luego hacerlos más exactos y completos. El uso de equipo accesorio para la microscopía de la fluorescencia con frecuencia permite hacer distensiones liptiníticos que aparecen uniformemente oscuros en luz reflejada blanca.

En este análisis será empleada la irradiación con luz azul en el análisis petrográfico, por el porcentaje de macerales liptiníticos que generalmente es mayor que cuando se utiliza la luz blanca convencional, debido a que la identificación es mucho mas sencilla observando los colores fluorescentes sobre una base oscura.

El siguiente proceso, es la preparación de las muestras para el estudio petrografico que se mostrara en detalle en el anexo I.

## **5.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

### **5.6.1 Generalidades**

El fin perseguido del análisis granulométrico es el de determinar la distribución de los distintos tamaños en la primera y segunda etapa de reducción de tamaño. Este método describe un procedimiento para la determinación por cernido de la distribución de los tamaños de un sistema particulado.

Una muestra representativa del sistema de peso conocido se somete a la acción de una serie de tamices o cedazos de aberturas o pasos progresivamente menores. De esta manera la muestra queda atrapada en los tamices correspondientes a un tamiz en particular, todas aquellas partículas con un tamaño menor que la malla del tamiz anterior y mayor que la malla del tamiz en cuestión.



Se emplean en el laboratorio una serie de tamices estandarizados constituidos por telas metálicas montadas en marcos firmes circulares de aproximadamente 20 cm de diámetro, cuyo pasos varían en proporción geométrica. Las más conocidas son la serie Tyler y la serie ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Para que en el proceso de tamizaje las partículas que son menores que las aberturas de los tamices puedan pasar con comodidad a través de ellos, se hace necesario la incorporación de un equipo que proporcione un movimiento vibratorio al conjunto de tamices o batería. Un factor importante en este proceso es el tiempo de tamizaje el cual influye en que la eficiencia del análisis sea representativa. Los análisis granulométricos fueron efectuados en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas de la Universidad Central de Venezuela.

## **5.7 ANÁLISIS DE VALORACIÓN DE RIESGOS**

Las pruebas generalmente miden algunos aspectos de la reactividad del carbón a oxidarse. Estas proveen un relativo rango de la propensidad del carbón a autocalentarse.

Las pruebas son:

- Técnicas adiabáticas de calentamiento: Ésta normalmente involucra el calentamiento del carbón en un recipiente aislante de calor, controlando la temperatura del horno para observar de cerca la temperatura de la muestra de carbón al reaccionar con el oxígeno. La temperatura máxima lograda por la muestra (Carras y Young, 1994) o el gradiente de la sección lineal de la gráfica de temperatura versus tiempo de oxidación (Cliff y otros, 1996) ha sido usada para clasificar los diferentes carbones. Una técnica cuenta en determinar la temperatura mínima de autocalentamiento (*Self Heating Temperature*, SHT). Los carbones con mínimo SHTs < 70°C son considerados que tienen un alto potencial de combustión espontánea,

aquellos con mínimo SHT entre 70 y 100°C un potencial medio, y aquellos por encima de los 100°C un bajo potencial.

- Calorimetría isothermal: La tasa de energía termal liberada mientras el carbón se oxida, bajo una temperatura constante, provee una medida de la propensidad al autocalentamiento. Las mediciones también se pueden llevar a cabo, a diferentes temperaturas, colocando el calorímetro en un horno (Carras y Young, 1994).
- Medición de la temperatura del punto de cruce. El carbón es calentado bajo específicas condiciones y la temperatura a la que la muestra de carbón excede la del horno o la del material inerte de referencia, es determinada. Este valor indica que la ignición ha comenzado (Carras y Young, 1994; Cliff y otros, 1996; Mikula y otros, 1992).

## CAPÍTULO VI. RESULTADOS DE LABORATORIO

En este capítulo se identificarán aquellos factores que pueden de una u otra forma promover el proceso de combustión espontánea en los carbones. Esto se ve asociado por los distintos resultados obtenidos de los diferentes análisis fisicoquímicos realizados en las muestras. Se presentan gráficos donde se establecen las temperaturas de ignición y autocalentamiento de cada manto.

### 6.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS INMEDIATOS Y ELEMENTALES

Estos análisis fueron realizados en los laboratorios de CDG-SA, y semanalmente hacen un informe donde reflejan toda la información que arrojaron los diferentes métodos. Son datos confiables, debido a la tecnología que poseen los laboratorios (ver Tabla 16 y 17).

**Tabla 16. Valores de los análisis inmediatos de cada manto.**

MANTO	PODER CALORIFICO (kcal/kg)	CENIZAS %	HUMEDAD	AZUFRE %	MAT. VOL. %	CARBONO
			INHERENTE %			FIJO %
4O	8068	3,00	1,80	0,64	35,5	59,7
4M	8102	3,03	1,97	0,52	35,55	59,45
4M1	7836	4,44	2,55	0,73	35,85	57,16
4M2	7659	5,35	2,32	0,88	35,96	56,37
5O	7997	6,02	2,25	0,56	34,94	56,79
5Q	7600	7,00	3,00	0,60	34,9	55,1
5M	8006	4,80	2,35	0,80	35,51	57,34
5M1	7834	5,80	2,16	1,01	35,87	56,17
5M2	7868	8,32	2,22	1,12	34,79	54,67
5N5	7773	5,72	2,31	0,88	34,52	57,45
5N7	7859	9,76	2,97	0,80	35,55	51,72
5N9	7088	12,41	2,92	0,92	34,75	49,92
6K	7324	8,96	3,11	1,86	35,1	52,83
6O	7882	7,81	2,25	0,82	35	54,94
6M	7959	4,73	2,34	0,85	35,86	57,07
6MO	7812	5,87	2,14	0,80	34,93	57,06
6Q	6987	16,81	2,65	0,93	29,95	50,59
7O	7967	3,45	2,39	0,59	36,83	57,33
7M	7951	3,88	3,27	0,74	34,54	58,31
7M2	7592	6,10	3,02	0,96	35,1	55,78
8M	7331	11,13	2,77	0,86	35,58	50,52
8K	7608	9,25	3,18	0,90	35,77	51,8
8KM	7998	5,79	2,75	0,97	36,44	55,02
8I	7791	8,67	2,63	0,86	34,26	54,44
9Q	7682	9,16	2,16	1,68	32,91	55,77
9O	7454	10,97	2,08	0,68	33,93	53,02
9K	7950	1,75	5,78	0,33	32,33	60,14
9G	7698	3,30	5,05	0,33	33,95	57,7
10M	7499	5,54	4,57	0,56	32,85	57,04
11M	7687	3,46	6,01	0,37	31,75	58,78
<b>Promedio</b>	<b>7728,73</b>	<b>6,74</b>	<b>2,90</b>	<b>0,82</b>	<b>34,69</b>	<b>55,67</b>

Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.

Los valores de Carbono Fijo fueron obtenidos aplicando la siguiente fórmula:

$$\%CF= 100-\% \text{ Cenizas}-\% \text{ Humedad Inherente}-\% \text{ Materia Volátil}$$

Donde,

CF= Carbono fijo

**Tabla 17. Valores de los análisis elementales de cada manto.**

MANTO	MAT. MINERAL %	CARBONO ELEMENTAL %	HIDROGENO %	NITROGENO %	OXIGENO %
4O	3,77	75,9	5,5	1,2	11,96
4M	3,77	80,1	5,7	1,2	7,48
4M1	5,50	80	5,7	1,2	5,38
4M2	6,62	79	5,7	1,2	5,55
5O	7,34	72,5	5,6	1,1	11,97
5Q	8,51	72	5,2	1,1	11,10
5M	5,95	79	5,8	1,2	6,05
5M1	7,19	78,6	5,6	1,2	5,63
5M2	10,21	74,6	5,4	1,2	7,14
5N5	7,06	76,5	5,7	1,1	7,79
5N7	11,84	78,2	5,6	1,2	1,47
5N9	15,02	71,8	5,2	1,1	5,65
6K	11,17	77	5,5	1,2	2,37
6O	9,53	77,7	5,5	1,2	4,72
6M	5,88	76,6	5,6	1,2	8,68
6MO	7,22	76,6	5,6	1,2	7,79
6Q	20,25	69,5	5,3	1,1	3,71
7O	4,29	75,7	5,6	1,2	11,07
7M	4,84	77,2	5,7	1,2	8,01
7M2	7,54	75,3	5,4	1,2	8,02
8M	13,48	78,2	5,6	1,2	0,24
8K	11,26	78,2	5,6	1,2	1,67
8KM	7,17	78,5	5,6	1,2	5,19
8I	10,56	74,6	5,5	1,2	6,54
9Q	11,36	74,6	5,4	1,2	5,80
9O	13,25	74,6	5,5	1,2	4,97
9K	2,20	77,2	5,7	1,1	8,14
9G	4,05	77,1	5,7	1,2	7,32
10M	6,77	76,7	5,6	1,2	5,83
11M	4,25	77,1	5,7	1,2	6,16
<b>Promedio</b>	<b>8,26</b>	<b>76,4</b>	<b>5,6</b>	<b>1,2</b>	<b>6,4</b>

Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.

Los Valores de Oxígeno, se obtuvieron aplicando la siguiente fórmula:

$$\%O=100- \%Cen-\%Hum-\%Azuf-\%Carbono Elemental-\%Hidrógeno-\%Nitrógeno$$

Donde,

%O: porcentaje de oxígeno

%Cen: porcentaje de cenizas

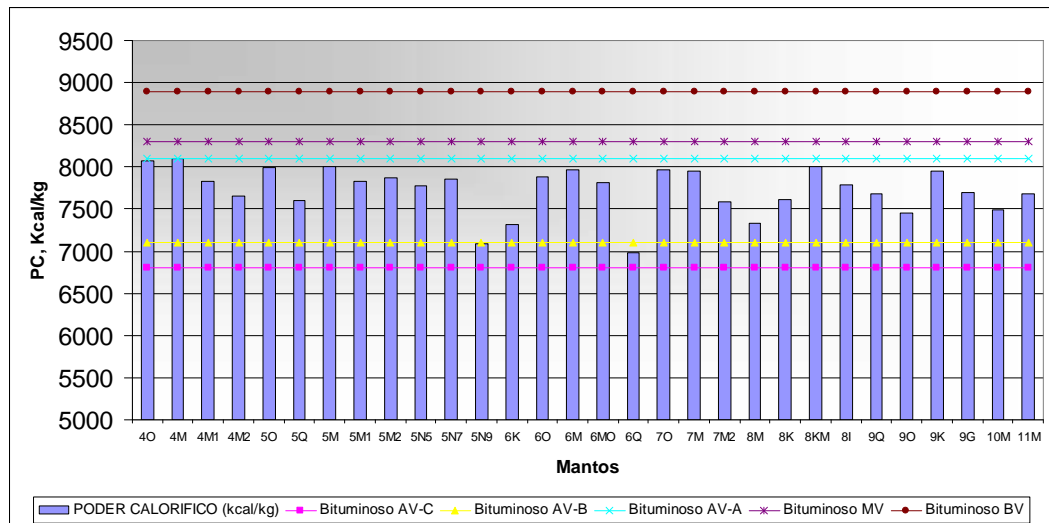
%Hum: porcentaje de humedad

%Azuf: porcentaje de azufre

Debido a que en los laboratorios de CDG-SA, no se realizan los análisis para obtener la materia mineral de los carbones, ésta fue calculada con la siguiente fórmula, conocida como Fórmula Parr (Chang, 1982):

$$\% \text{Materia Mineral} = 1,1878 * \text{Cenizas} + 0,25915 * \text{Azufre} + 0,0408$$

Usando la clasificación ASTM del carbón según su poder calorífico, se obtuvo exactamente sobre qué tipo de carbón se trabajó. La Figura 43 se elaboró con los valores obtenidos de los análisis al carbón con respecto a su poder calorífico.



**Figura 43. Clasificación del carbón según su poder calorífico en muestras de Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

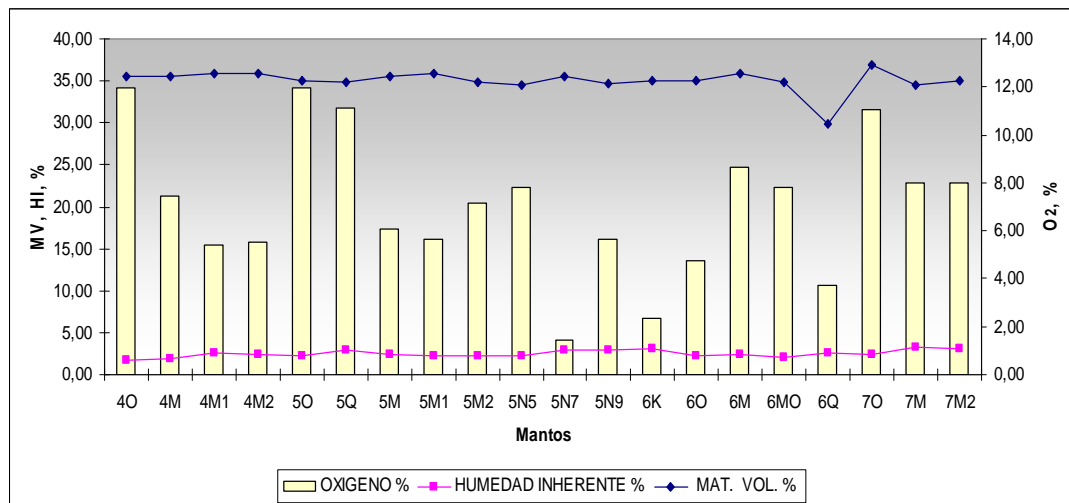
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

El rango del carbón es quizás el factor más importante en la determinación de la tendencia del carbón hacia la combustión espontánea. Según la figura 43, el carbón muestreado en este estudio, en sitios donde se presentan las fumarolas es del tipo Bituminoso Alto Volátil A-B.

Generalmente, mientras que el rango del carbón disminuye, el peligro de combustión espontánea disminuye. Los carbones de bajo rango (lignito y subbituminoso) son usualmente los más susceptibles para el calentamiento espontáneo, debido a sus altas reacciones. Estos son típicamente altos en

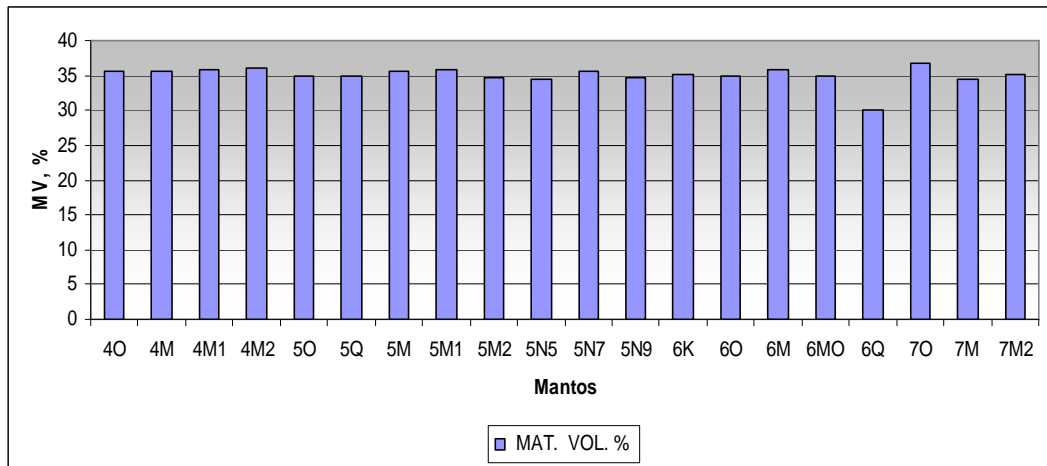
humedad, contenido de oxígeno y material volátil, factores que contribuyen a su rápida tasa de oxidación.

En la Figura 44 se presenta una correlación entre los valores del contenido de humedad inherente, el contenido de oxígeno y el contenido de materia volátil. Se observó que muchos de los mantos tienen valores de oxígeno muy altos en correlación a otros. Esto junto con su contenido de materia volátil y humedad inherente, que se hacen altos en algunos casos, hacen que sean mantos muy susceptibles al autocalentamiento.



**Figura 44. Contenidos de Oxígeno, Humedad inherente y Materia Volátil de muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**  
Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.

Ha sido concluido por varios investigadores que carbones de alto a medio-volátil (materia volátil mayor que 18 %) oxidizan mas rápido que los carbones de bajo-volátil, y los carbones de alto-volátil son más susceptibles al calentamiento espontáneo que los carbones medio-volátil. En la Figura 45 se dan los valores de materia volátil de cada manto y se aprecia que son valores muy altos, es decir, que estos son carbones de Alta Material Volátil. Por consiguiente los carbones de fosa Baqueta se oxidan más rápido al momento de producirse el autocalentamiento.



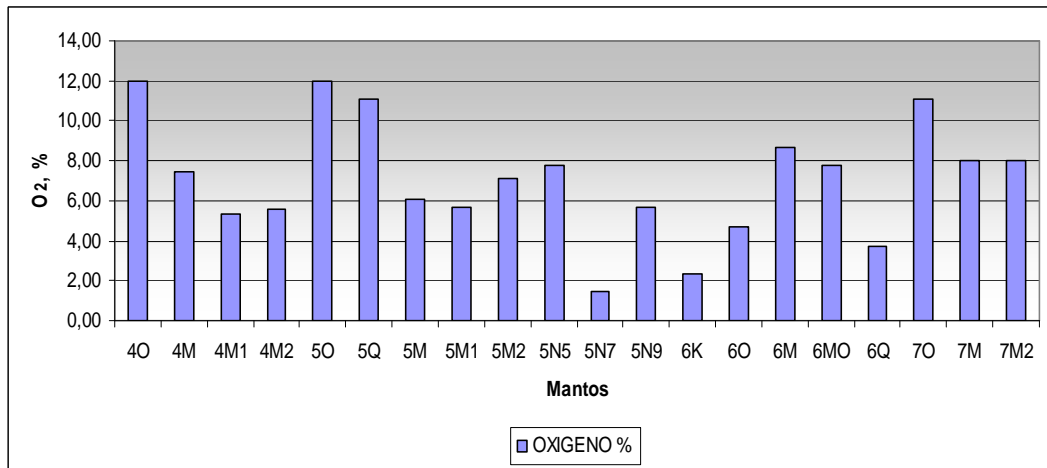
**Figura 45. Contenido de Materia Volátil de muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

El aumento de reacción de los carbones de bajo rango es atribuido a su alto contenido de oxígeno inherente (que está en su estructura). La tasa de oxidación disminuye con la disminución del contenido de oxígeno, aunque la tendencia al calentamiento no es en todos los casos proporcional al contenido de oxígeno. En la Figura 46 se observó que el contenido de oxígeno en los mantos, es muy variable, esto se debe a la profundidad donde se encuentran y al tiempo durante el cual han estado expuestos a la atmósfera, debido a la excavación minera.

En cualquier lugar de la superficie del carbón la tasa de oxidación es directamente proporcional a la concentración de oxígeno, esto es, la presión parcial de oxígeno que rodea las partículas. Para una atmósfera desprovista de oxígeno, la tasa de oxidación es cero, indiferentemente de todos los demás factores. El carbón puede ser almacenado en agua indefinidamente, sin la presencia de aire y no presentará oxidación.

Al comparar el aumento de peso global del carbón con la disminución del mismo debido a los productos liberados, se encontró que el proceso de adsorción de oxígeno está favorecido con respecto al proceso de desorción de dióxido de carbono y agua.



**Figura 46. Contenido de Oxígeno de muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

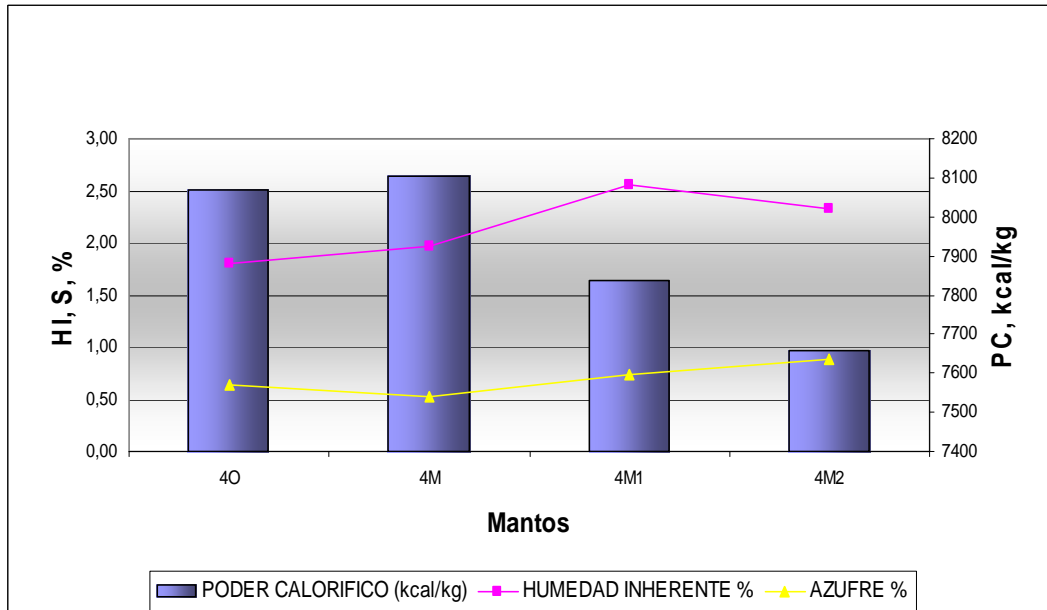
Al estudiar los carbones de diferentes mantos y profundidades, se encontró que las muestras del manto más superficial se oxidan más rápido que los mantos más profundos, y que en ambos casos, hay un aumento de la velocidad de reacción con la temperatura. El aumento de la temperatura ocurre mientras el proceso de oxidación se mantenga activo.

El poder calorífico en la fosa Baqueta de mina Paso Diablo no está relacionado con el contenido de azufre y de la humedad inherente, dado que un carbón puede ser de:

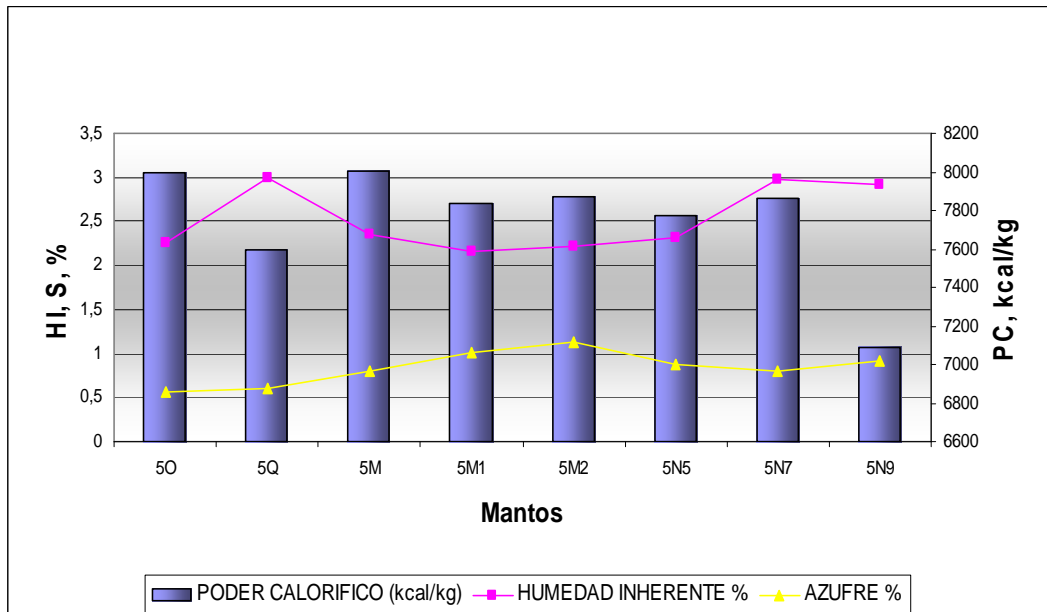
- Alto poder calorífico, bajo contenido de humedad inherente y alto contenido de azufre.
- Alto poder calorífico, alto contenido de humedad inherente y bajo contenido de azufre.
- Bajo poder calorífico, alto contenido de humedad inherente y bajo contenido de azufre.
- Bajo poder calorífico, bajo contenido de humedad inherente y alto contenido de azufre.

Se Determinó de esta manera que cualquier manto es propenso a la combustión espontánea. Esto se observa con más detalle en los gráficos a continuación (ver Figuras 47-51).

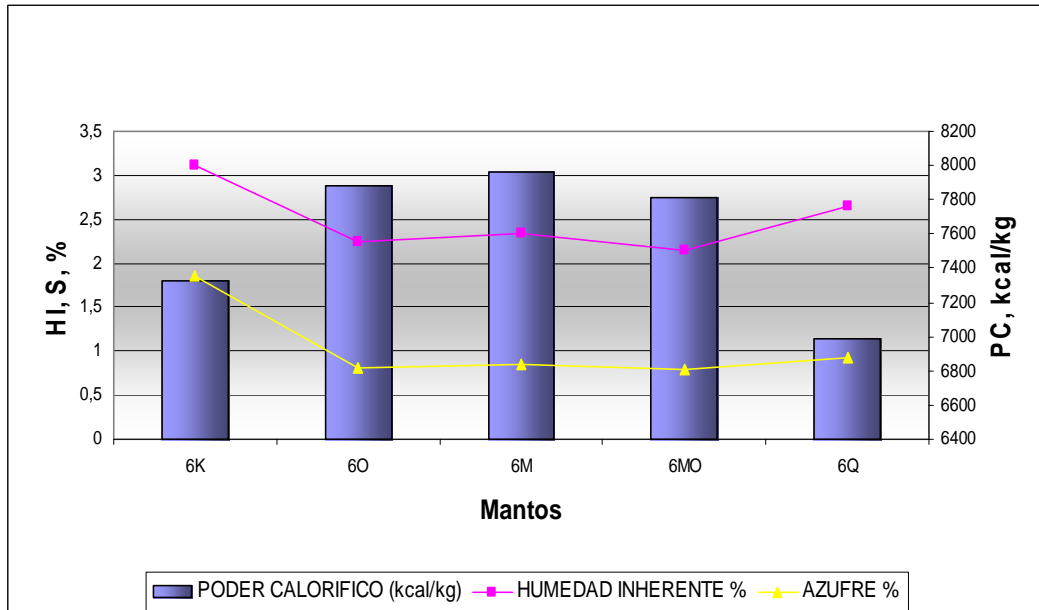




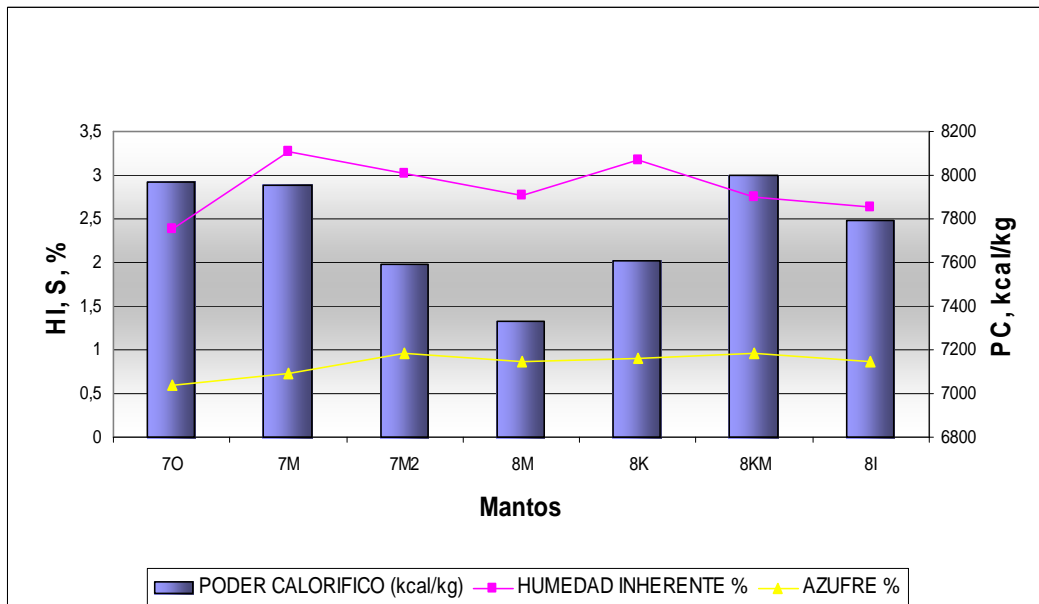
**Figura 47. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 4O al 4M2.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**



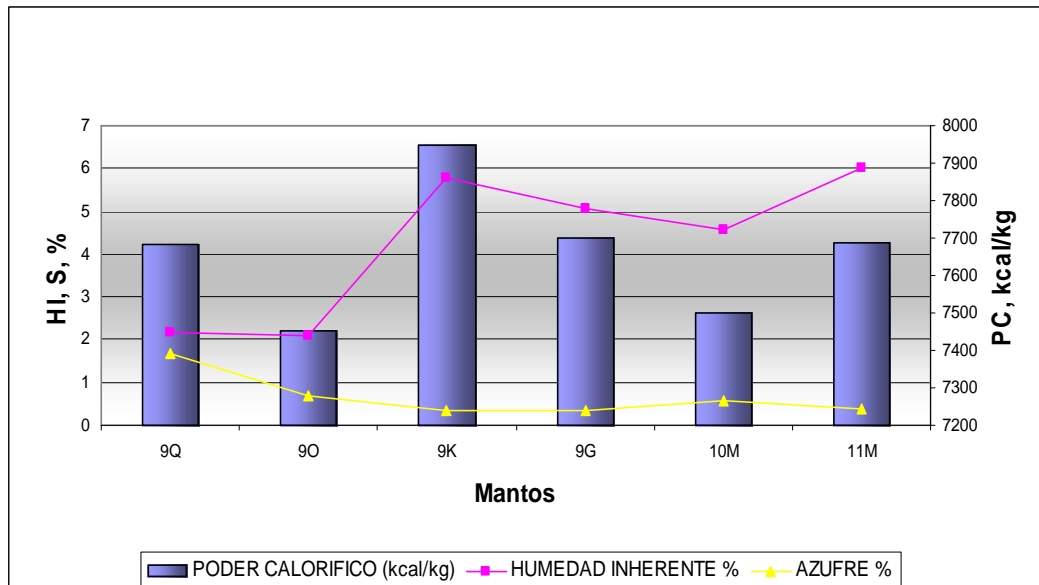
**Figura 48. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 5O al 5N9.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**



**Figura 49. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 6K al 6Q.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

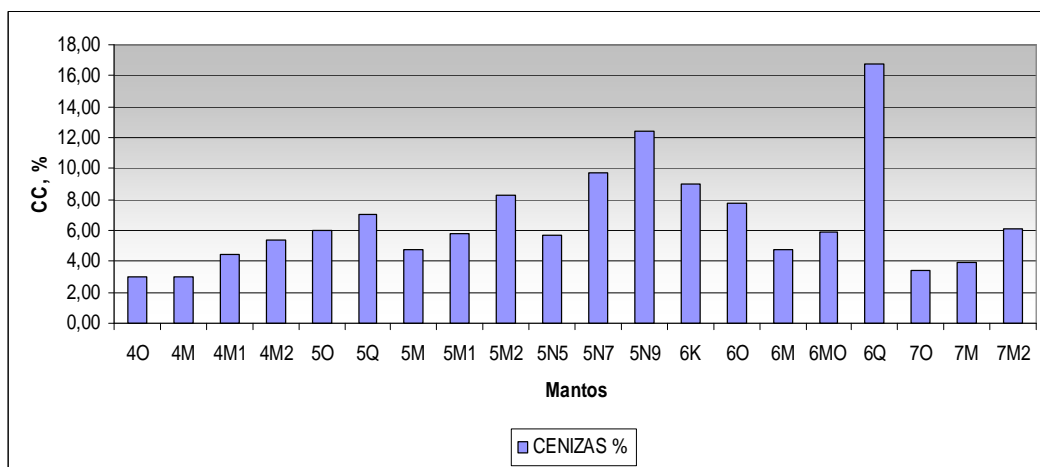


**Figura 50. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 7O al 8I.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**



**Figura 51. Diagrama comparativo de valores de poder calorífico, humedad inherente y contenido de azufre en mantos 9Q al 11M.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

La oxidación ocurre principalmente en las porciones orgánicas del carbón y sólo ligeramente en los constituyentes minerales. Las cenizas en el carbón generalmente disminuyen la tasa de oxidación, pero puede estar influenciado a gran magnitud por la composición mineral de las cenizas, que tiene efecto acelerador e inhibidor sobre la oxidación. En la Figura 52 se observó que los mantos 4O, 4M, 5O, 5M, 6M, son los que tienen menor contenido de cenizas, por lo tanto, son más propensos a tener una tasa de oxidación alta.



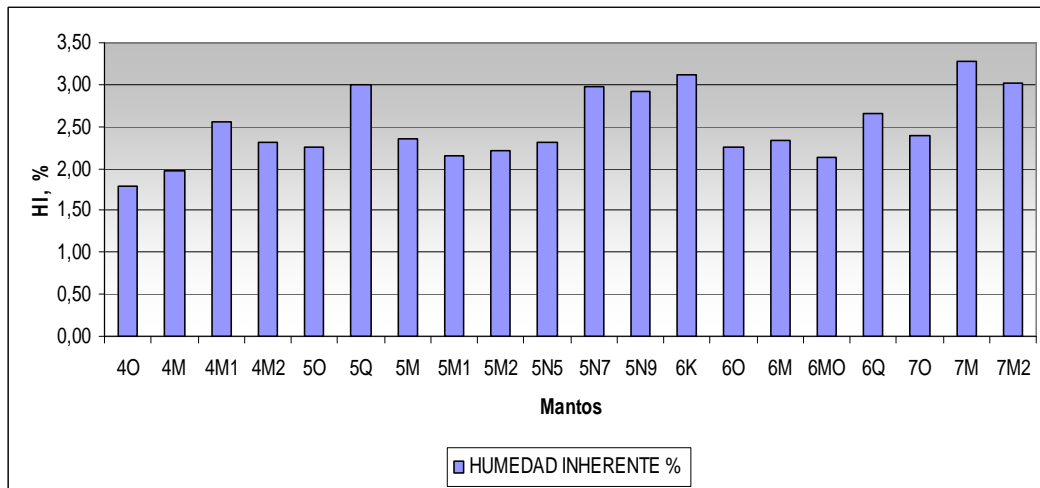
**Figura 52. Contenido de Cenizas en las muestras de carbón en Fosa Baqueta en mina Paso Diablo.**  
**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

La oxidación del carbón en aire, a temperatura ambiente, toma lugar prácticamente siempre en la presencia de la humedad relativa presente en la atmósfera oxidante que la rodea, o que está inherente en el carbón, o la formada a través de la oxidación. Como la habilidad del carbón para absorber humedad, es considerablemente más alta que para absorber el oxígeno y el nitrógeno, el agua formada debido a la reacción de oxidación es mayormente absorbida en el carbón afectando su habilidad para absorber oxígeno, por el impedimento de su difusión y de su tasa de oxidación. No obstante, un alto contenido de humedad inherente y oxígeno, encontrado en los carbones de bajo rango y la presencia de la humedad de la atmósfera en la mina Paso Diablo, es reportado como ser indicativo de la tendencia al calentamiento espontáneo

Está claro que la presencia de humedad tiende a reducir el calentamiento espontáneo, debido al calor de vaporización latente y al alto calor de agua específico. La pérdida de humedad del carbón por desorción y evaporación son procesos endotérmicos. De esta manera, la temperatura del carbón baja retardando el proceso de autocalentamiento. La pérdida de humedad ocurre cuando el aire con una baja humedad relativa, fluye a través del manto. Finalmente, una temperatura constante es alcanzada y es mantenida con tal que haya humedad en el carbón.

Tan pronto como el carbón es secado, la temperatura en el sitio se eleva, debido a que el calor de oxidación ya no puede ser eliminado por evaporación. Esto puede llevar a una ignición local (punto caliente o fumarola) en el manto (Schmal, 1989).

Como muestra la figura 53, los carbones de bajo rango tienen alto contenido de humedad inherente, un alto contenido de humedad, típicamente, disminuye el valor del carbón, aumenta los costos de transporte y puede causar problemas de manejo. Secando estos carbones minimiza estos problemas pero aumenta el riesgo a la combustión espontánea en los mantos.



**Figura 53. Contenido de Humedad Inherente en las muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

**Fuente: Elaboración Propia con datos de CDG-SA.**

Como se muestra en la figura 53 los mantos de mejor calidad, tal es el caso de los mantos del grupo 4, 5 y 6 en la fosa Baqueta, tienen un contenido de humedad inherente bajo, por esa razón tienden a perder más rápidamente su humedad al ser expuestos a la atmósfera. Al suceder esto quedan expuestos a las corrientes de aire con el contenido de  $O_2$  molecular y puede comenzar a producirse la oxidación, y por consiguiente, se inicia el proceso de combustión.

## 6.2 ANÁLISIS MINERALÓGICO

### 6.2.1 Contenido de Pirita

La pirita férrica ( $FeS_2$ ) que frecuentemente está presente en partículas discretas en los mantos de carbón, en una extensa variedad de formas y tamaños, oxidiza fácilmente a temperaturas ordinarias por la presencia de humedad y aire, produciéndose combinaciones de reacciones que llevan a la formación de sulfato de hierro y ácido sulfúrico incrementando el volumen del carbón y la acidez del drenaje, liberando calor. De acuerdo con Münzner (1996), el cambio de calor causado por la oxidación es la misma para el carbón y la pirita en estado seco y la reactividad del carbón es sólo duplicada cuando se humedece. La oxidación de la

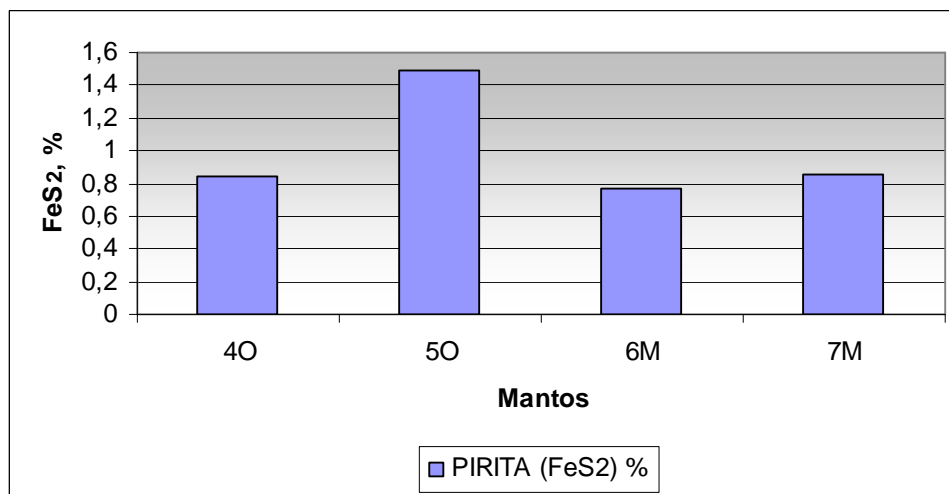
pirita en la presencia de humedad libre tiene sólo un efecto promotor en la auto-oxidación del carbón.

La oxidación de la pirita resulta en un aumento del volumen del carbón que a su vez puede crear micro-fracturas dentro del carbón, incrementando así el área de superficie expuesta. Es por esta razón que es imprescindible conocer el contenido de pirita en los carbones (Ver Tabla 18)

**Tabla 18. Contenido de Pirita en las muestras de carbón en Fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

MANTO	HIERRO %	PIRITA (FeS <sub>2</sub> ) %
4O	1,01	0,84
5O	2,31	1,49
6M	0,7	0,77
7M	0,96	0,86

**Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 54. Porcentaje de pirita en diferentes muestras de carbón en fosa Baqueta de mina Paso Diablo.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

Como se aprecia en la figura 54 el contenido de pirita en el manto 5O resulta el doble de los otros mantos. Esto permite que este grupo, al tener mucha humedad inherente, resulte más susceptible al autocalentamiento. Por otra parte, los valores obtenidos son bajos y siendo éstos mantos los de mejor calidad, es posible establecer que no hay motivo alguno para concluir que la pirita sea

promotora de la combustión espontánea. Incluso aunque hubiera suficiente contenido de humedad inherente en el carbón o humedad relativa en la atmósfera.

### **6.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Una disminución en el tamaño de las partículas proporciona una mayor área de superficie y un mayor riesgo de autocalentamiento. El efecto del tamaño de partícula puede también depender de la porosidad del carbón (Ünal, 1995). Un carbón más poroso tiene mayor área expuesta para la oxidación. Generalmente, la porosidad del carbón aumenta con la disminución del rango del carbón.

La cantidad generada de finos de carbón (sobretiturados) y la distribución del tamaño de partículas están relacionadas con la friabilidad del carbón; los carbones de bajo rango son más friables que los de alto rango. Más aun, el tiempo de exposición a la atmósfera puede hacer al carbón más friable.

Es por eso importante conocer la granulometría de las muestras de carbón, para así saber cuáles son más propensos a disminuir de tamaño y de tal forma conocer su susceptibilidad al autocalentamiento.

A continuación se presentan las gráficas (ver figuras 55-62) donde se presentarán los resultados de los análisis granulométricos hechos a las muestras de carbón de los distintos mantos. El proceso mecánico de reducción de tamaño de los 4 sacos, con 10 kilos cada uno, de material se hizo con: trituración primaria y secundaria, y en cada una se presentó su respectivo gráfico para observar la distribución de tamaños del carbón. La trituración primaria se realizó con la trituradora de mandíbula marca Denver®, modelo 201661, con capacidad de alimentación de 12 x 8cm. La trituración secundaria se realizó por medio de la trituradora de rodillo marca Louis-Allis®. Estos equipos se encuentran en el Laboratorio de Menas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela.

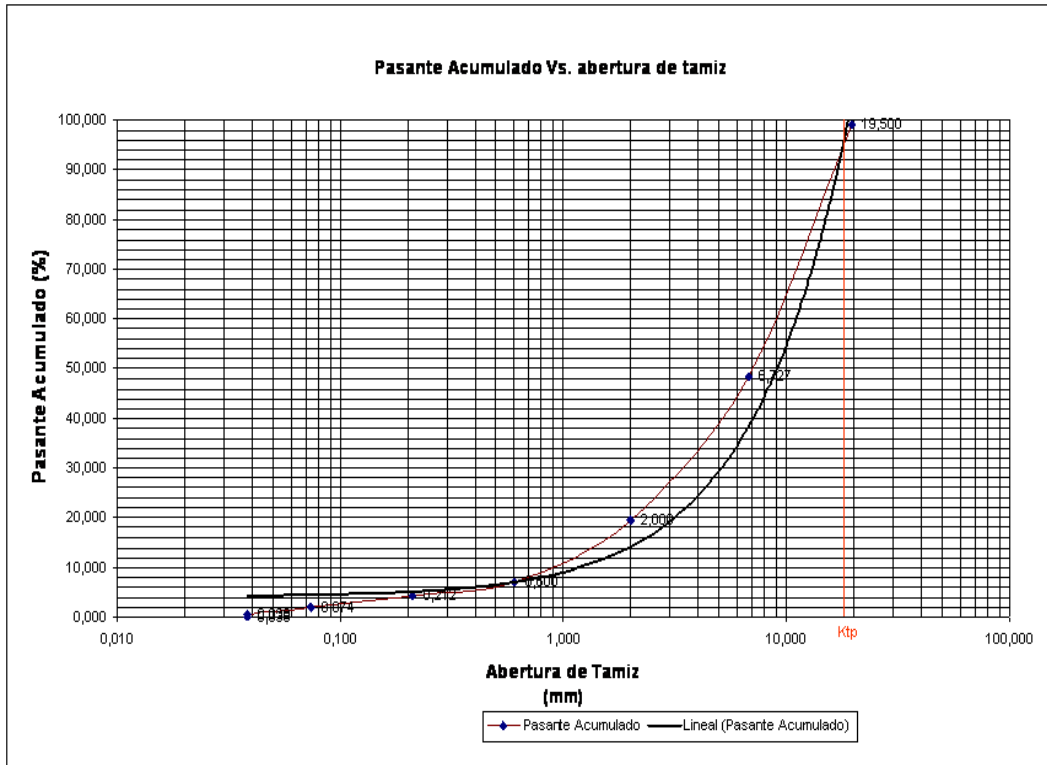


Figura 55. Gráfico trituration primaria muestra de carbón de manto 40.  
Fuente: Elaboración propia.

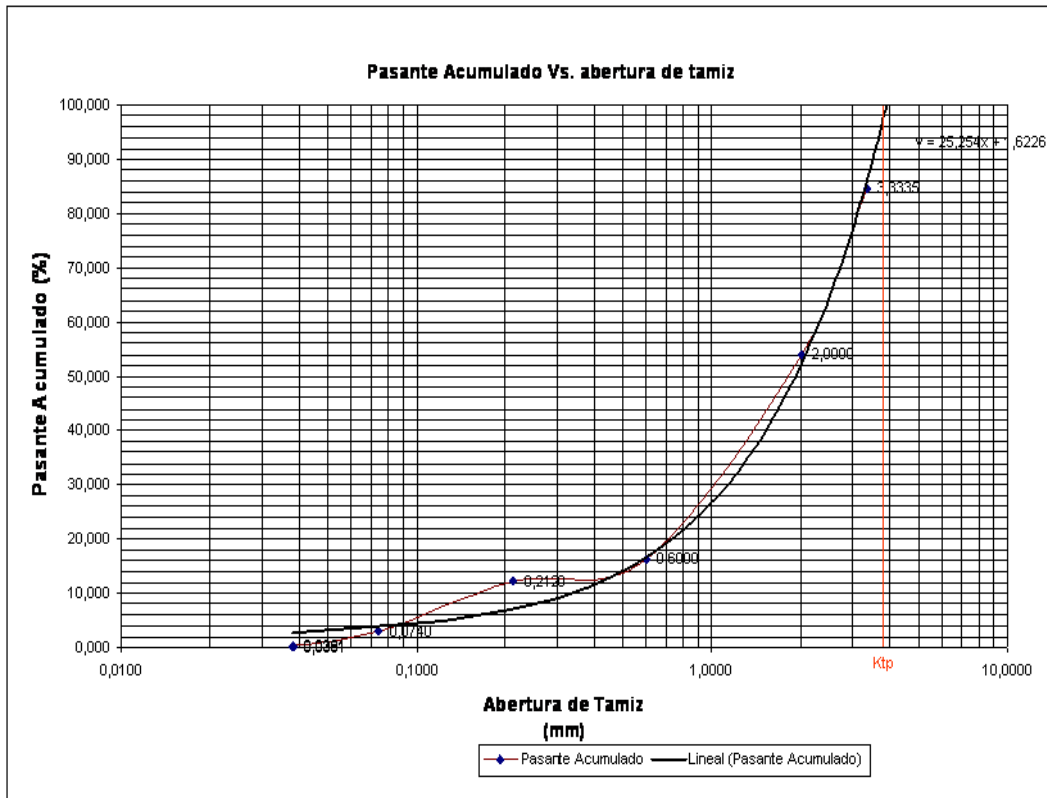


Figura 56. Gráfico trituration secundaria muestra de carbón de manto 40.  
Fuente: Elaboración propia.



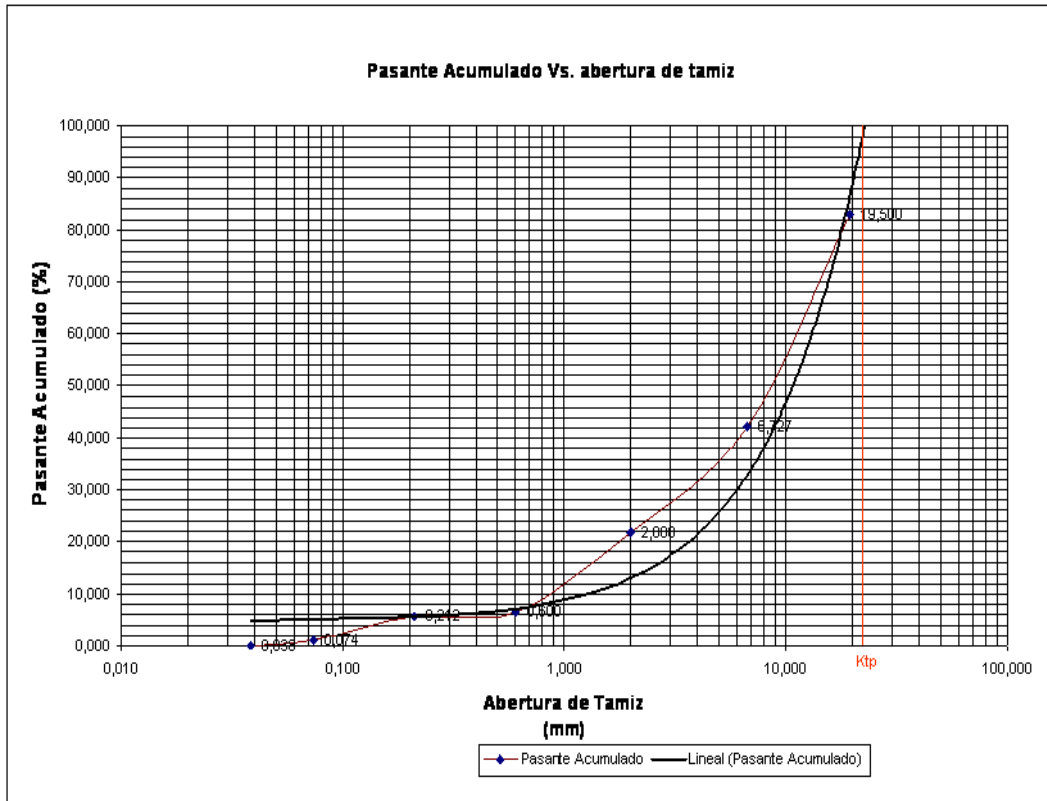


Figura 57. Gráfico trituration primaria muestra de carbón de manto 50.  
Fuente: Elaboración propia.

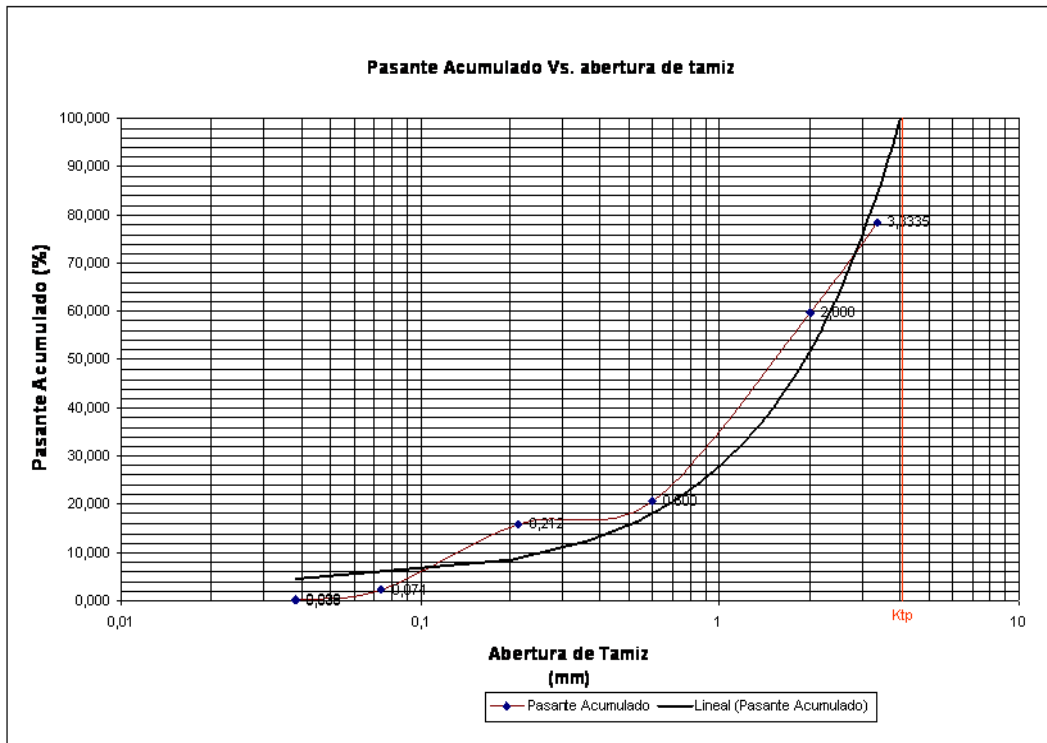


Figura 58. Gráfico trituration secundaria muestra de carbón de manto 50.  
Fuente: Elaboración propia.

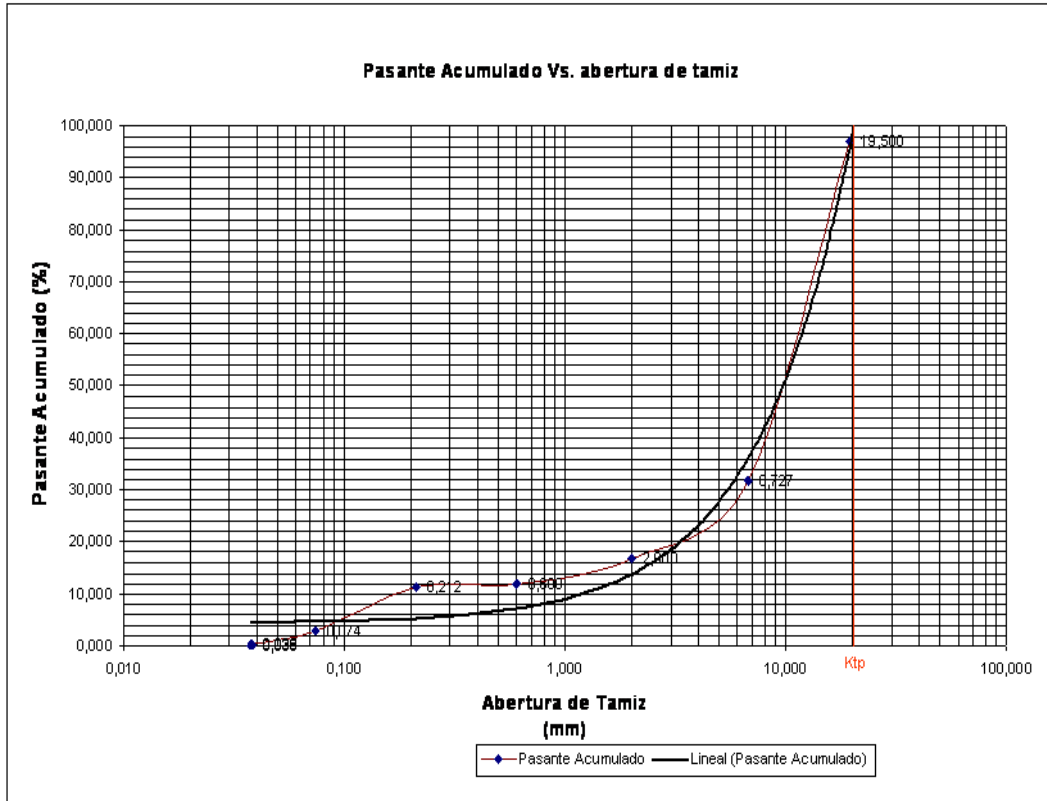


Figura 59. Gráfico trituration primaria muestra de carbón de manto 7M.  
Fuente: Elaboración propia.

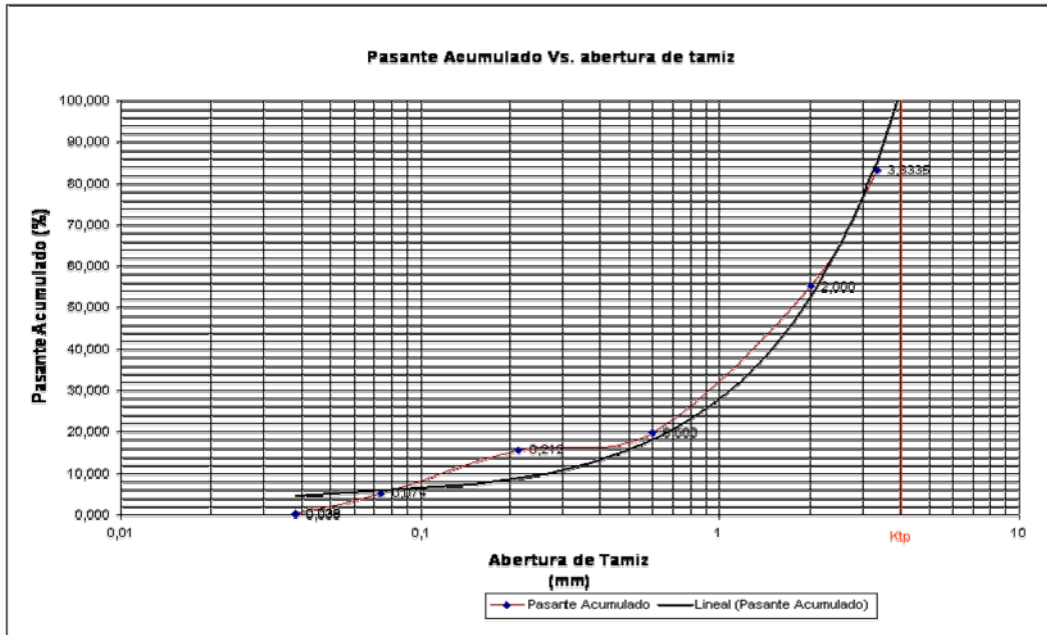


Figura 60. Gráfico trituration secundaria muestra de carbón de manto 7M.  
Fuente: Elaboración propia.

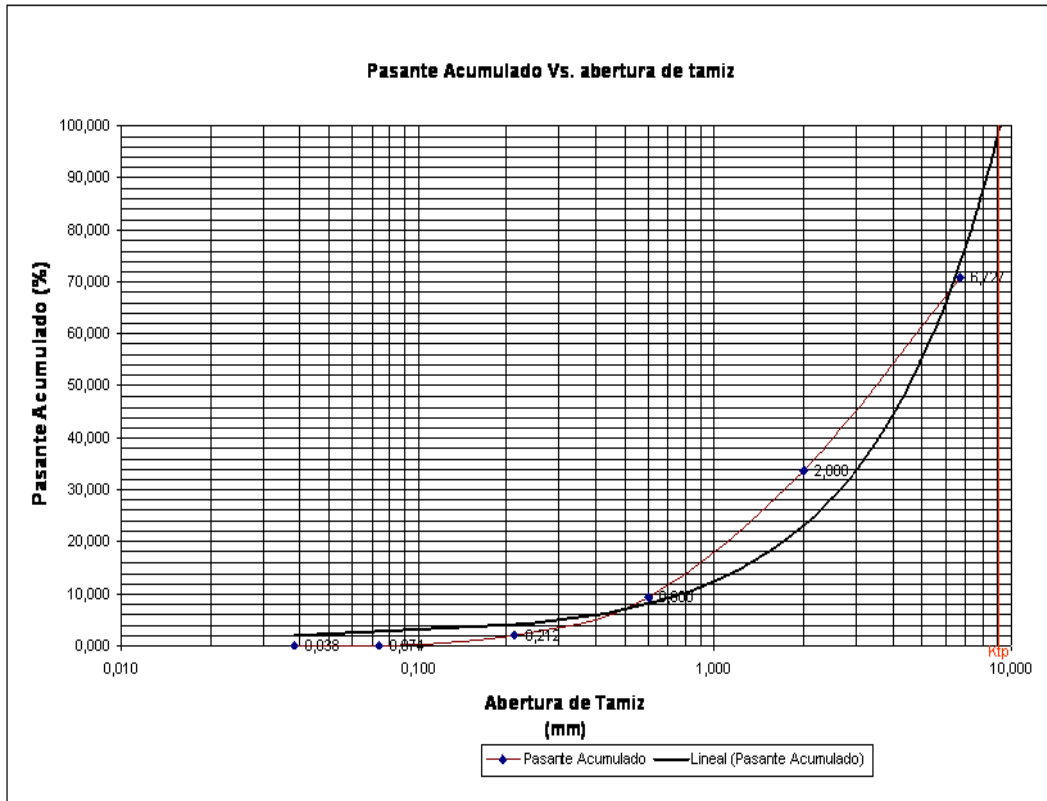


Figura 61. Gráfico trituration primaria muestra de carbón de manto 6M.  
Fuente: Elaboración propia.

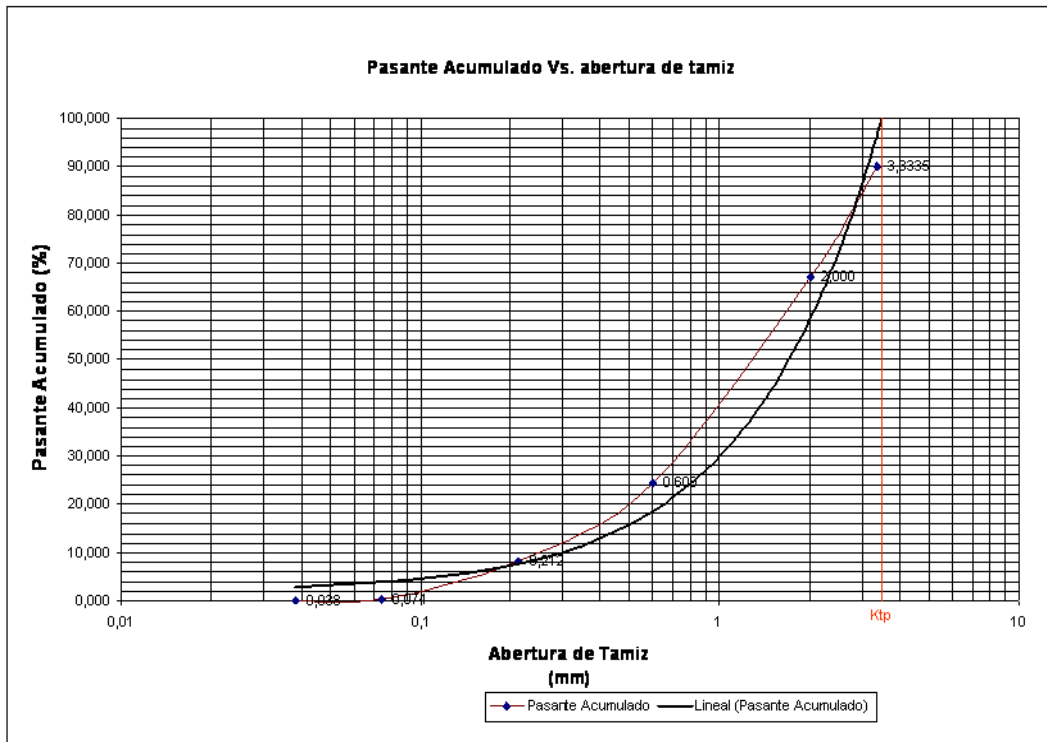


Figura 62. Gráfico trituration secundaria muestra de carbón de manto 6M.  
Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos de los análisis granulométricos, producto de la reducción mecánica del mineral, se observó la considerable generación de finos de carbón, aproximadamente un 15%. Tomando en cuenta el tamaño de las muestras de mano, que fue 15-20 cm y observando que el tamaño máximo de partículas para la trituración primaria que fue de  $\pm 18$  mm, se obtuvo una relación de reducción de tamaño de 15:1.

En la trituración secundaria, se obtuvo un tamaño máximo de partículas de 4 mm, por lo tanto la relación de reducción de tamaño se hace mayor, alrededor de 2:1.

Se correlacionó toda esta información para concluir que no hay mucha diferencia entre la generación de finos entre los distintos mantos. Esto se debe a que son mantos de calidad muy parecida, y su friabilidad es casi exactamente igual.

Los carbones utilizados en estos ensayos tienen mucha facilidad para quebrarse. Se hace más complicado en aquellos casos donde la planificación de la perforación y voladura se excede de los patrones y factores de carga, y ocurre quebramiento del carbón, debido a la onda de expansión que llega a tocar el manto de carbón. Por esta razón es muy importante limitarse a los patrones de voladura estipulados para no crear sobrepeso en los mantos, y por lo tanto inducir grietas, por donde entra el aire y hace contacto con el carbón, produciendo así la autooxidación del mismo. Las tablas se muestran en detalle en el anexo J.

#### **6.4 ANÁLISIS PETROGRÁFICO**

Las opiniones fueron distintas por mucho tiempo acerca de la influencia de la composición petrográfica del carbón en la susceptibilidad para la combustión espontánea. Es ahora generalmente aceptado que la facilidad de oxidación del carbón disminuye en el siguiente orden de los macroconstituyentes: vitrina, clarina, durina y fusina.

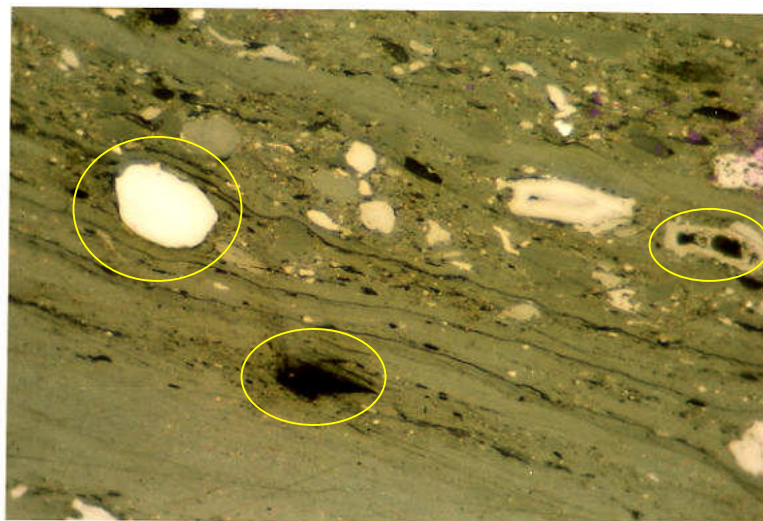
El trabajo repasado por Gray y Lowenhaupt (1989) muestra que la exinita tiene una mayor tasa de oxidación, específicamente a temperaturas mayores a 75°C, que la vitrinita y la inertita.

#### 6.4.1 Resultados de las Mediciones de los Macerales

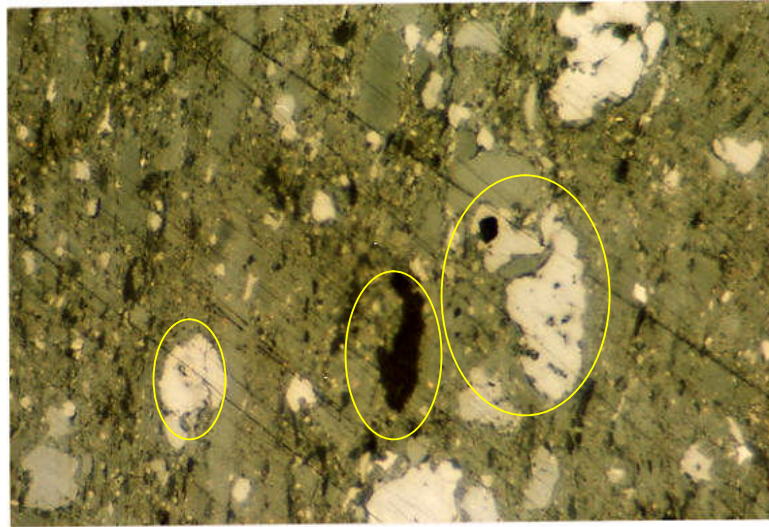
De acuerdo al análisis de macerales presentes en las muestras se obtuvieron los siguientes resultados; en valores porcentuales:

Vitrinita -----	70%
Exinita -----	7%
Inertinita -----	20%
Matriz Mineral -----	3%

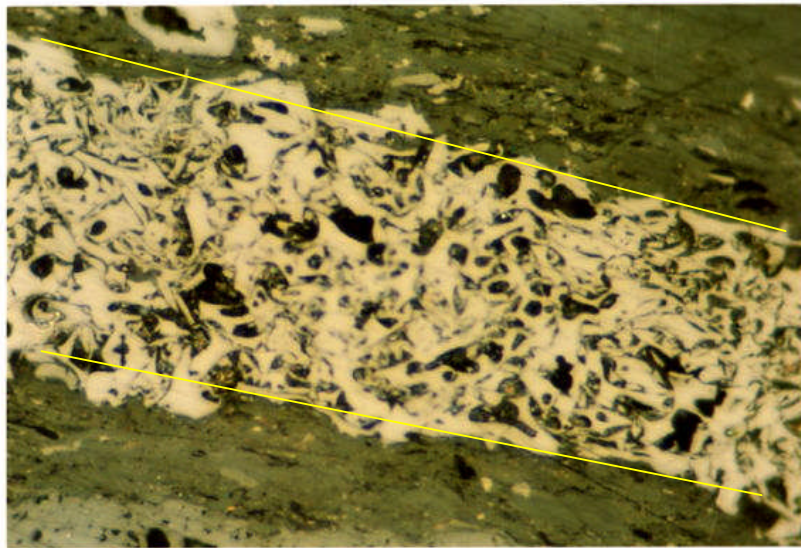
A continuación se pueden observar las imágenes efectuadas durante el análisis petrográfico de las muestras. Estos análisis se obtuvieron de secciones finas de las muestras de carbón en fosa Baqueta de mina Paso Diablo y fueron realizadas en el Laboratorio de Petrografía del INZIT-CICASI. Las técnicas se ven en detalle en los anexos E,



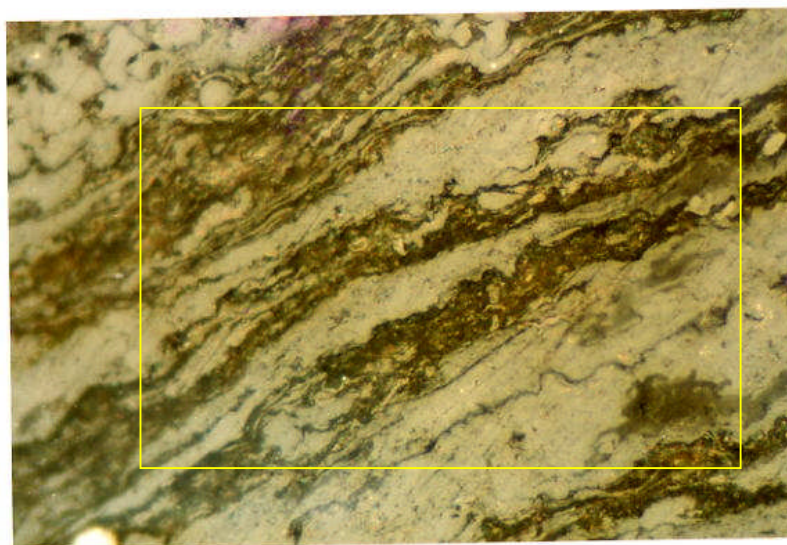
**Figura 63. Trimacerita: asociación de los tres macerales principales Vitrinita, Exinita e Inertinita observados en el manto 40.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 64. Capas de Vitrinita con aporte de Inertinita observados en el manto 50.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 65. Fusinita en el Rango de Inertinita observado en el manto 6M.  
Fuente: Elaboración Propia**



**Figura 66. Vitrinita con intercalaciones de Matriz Mineral observado en el manto 7M.  
Fuente: Elaboración Propia.**

#### **6.4.2 Resultados de la Reflectancia de la Vitrinita**

La medición de la reflectancia de la vitrinita se efectuó sobre cuatro muestras denominadas 4O, 5O, 6M y 7M. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Petrografía del INZIT-CICASI. Las técnicas de medición de la reflectancia de la vitrinita se muestran en detalle en los anexos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Valores en el manto 4O:

Reflectancia mínima -----	0,7 %
Reflectancia máxima -----	0,9 %
Reflectancia promedio -----	0,8067 %
Desviación Estándar -----	3,10094E-2
Número de mediciones -----	77

Valores en el manto 5O:

Reflectancia mínima ----- 0,65 %  
Reflectancia máxima ----- 0,9 %  
Reflectancia promedio ----- 0,7734 %  
Desviación Estándar ----- 5,035072E-2  
Número de mediciones ----- 101

Valores en el manto 6M:

Reflectancia mínima ----- 0,75 %  
Reflectancia máxima ----- 0,9 %  
Reflectancia promedio ----- 0,7578 %  
Desviación Estándar ----- 5,20594E-2  
Número de mediciones ----- 79

Valores en el manto 7M:

Reflectancia mínima ----- 0,6 %  
Reflectancia máxima ----- 0,9 %  
Reflectancia promedio ----- 0,7954 %  
Desviación Estándar ----- 4,34057E-2  
Número de mediciones ----- 85

De los resultados obtenidos se observan los constituyentes microscópicos del carbón, llamados macerales, de acuerdo a su color, morfología y brillo. El ensayo se realizó utilizando las normas del Internacional *Committe of Coal Petrology* (ICCP).

De acuerdo a estos resultados, la presencia del maceral Vitrinita es el que está presente en mayores proporciones que los demás, por lo tanto es un factor importante al momento de la aceleración de oxidación del carbón. Estos



resultados también muestran la ausencia de metamorfismo en estas rocas, reflejando sólo un alto grado de diagénesis en transición al metamorfismo. En estos cuatro mantos se observa el mismo porcentaje de reflectancia de la vitrinita y por lo tanto tienen el mismo potencial de influencia a la combustión espontánea.

Al generarse exsudatinita, la cual está presente en pequeñas cantidades, llega a fracturar las vesículas y microfracturas de las vitrinitas, logrando la interconexión de las vesículas y poros. El posterior craqueo térmico de la exsudatinita genera un volumen de gas lo suficientemente grande como para fracturar el carbón vesiculado por presión de poros, permitiendo la migración de los hidrocarburos generados fuera del carbón y la entrada de flujo de aire, produciendo así la oxidación del carbón.

## **6.5 ANÁLISIS DE VALORACIÓN DE RIESGOS**

Es importante que los operadores de carbón, aquellos quienes participan en cualquier fase de manejo, almacenaje y transporte del carbón, conozca cómo un carbón, en particular, desarrolla autocalentamiento llevando a la combustión espontánea. Un número de ensayos de laboratorio se han inventado para inhibir este proceso térmico.

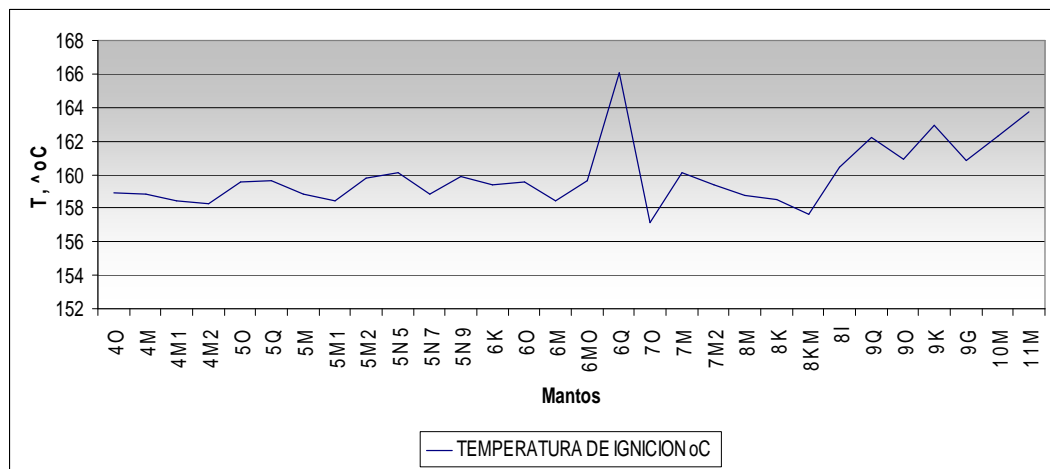
El laboratorio de Incolab Services de Venezuela realiza la determinación de la temperatura mínima de autocalentamiento (SHTs), para diferentes carbones en un horno adiabático. Esto muestra que mientras más bajo sea la SHT, mayor posibilidades tendrá el carbón de autocalentarse.

A continuación se muestran algunas tablas (19-21) y gráficas (67-69) donde se presenta la temperatura de ignición de los carbones de la fosa Baqueta, así como también la potencialidad de combustión de cada manto y la tasa de combustión que se produce en una temperatura específica.

**Tabla 19. Temperatura de ignición de los mantos en la Fosa Baqueta.**

MANTO	TEMPERATURA DE IGNICION oC	MANTO	TEMPERATURA DE IGNICION oC
4O	159	6Q	166
4M	159	7O	157
4M1	158	7M	160
4M2	158	7M2	159
5O	160	8M	159
5Q	160	8K	159
5M	159	8KM	158
5M1	158	8I	160
5M2	160	9Q	162
5N5	160	9O	161
5N7	159	9K	163
5N9	160	9G	161
6K	159	10M	162
6O	160	11M	164
6M	158	<b>Promedio</b>	<b>159,15</b>
6MO	160		

**Fuente: Elaboración Propia**



**Figura 67. Gráfica de temperatura de ignición de los mantos en Fosa Baqueta.**

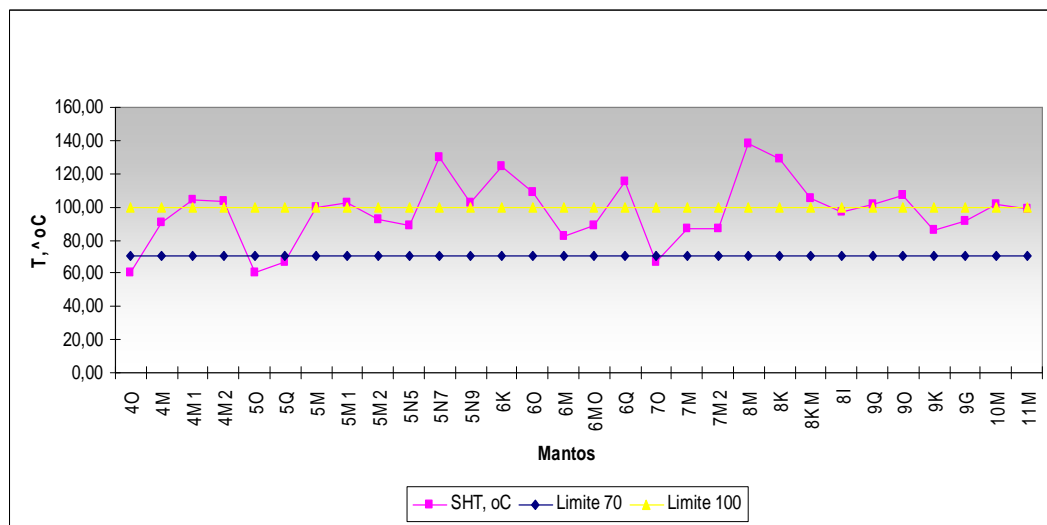
**Fuente: Elaboración Propia**

Se puede apreciar en la figura 67 que la temperatura de ignición de los mantos es muy parecida, esto significa que el contenido de materia volátil de los carbones no difiere mucho, dando a determinar que es un factor importante al momento de conocer la capacidad de autocombustión del carbón.

**Tabla 20. Potencialidad de autocalentamiento de los mantos en Fosa Baqueta.**

MANTO	SHT, °C	OXIGENO, % (daf)	MANTO	SHT, °C	OXIGENO, % (daf)
4O	60,76	11,96	6Q	115,21	3,71
4M	90,33	7,48	7O	66,64	11,07
4M1	104,19	5,38	7M	86,83	8,01
4M2	103,07	5,55	7M2	86,77	8,02
5O	60,70	11,97	8M	138,12	0,24
5Q	66,44	11,10	8K	128,68	1,67
5M	99,77	6,05	8KM	105,45	5,19
5M1	102,54	5,63	8I	96,54	6,54
5M2	92,58	7,14	9Q	101,42	5,80
5N5	88,29	7,79	9O	106,90	4,97
5N7	130,00	1,47	9K	85,98	8,14
5N9	102,41	5,65	9G	91,39	7,32
6K	124,06	2,37	10M	101,22	5,83
6O	108,55	4,72	11M	99,04	6,16
6M	82,41	8,68			
6MO	88,29	7,79			

Fuente: Elaboración Propia



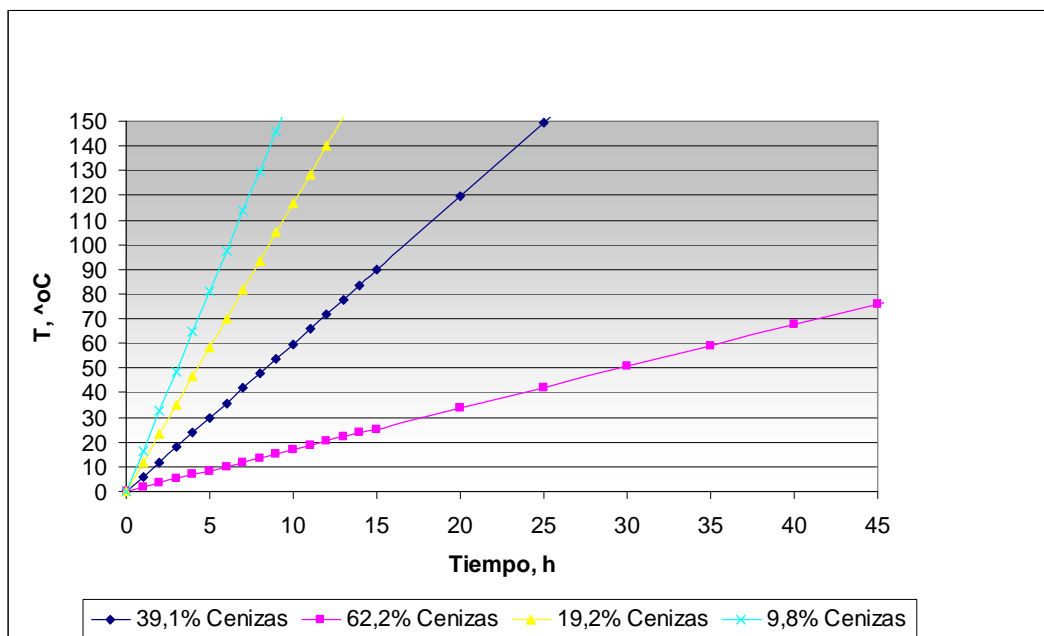
**Figura 68. Gráfica de potencialidad de autocalentamiento de los mantos en Fosa Baqueta.**

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 68 se muestra que los valores mayores a 100 (SHT) son bajo potencial de combustión espontánea, los valores entre 70-100 (SHT) son de medio potencial de combustión espontánea, y los valores menores de 70 (SHT) son alto potencial de combustión espontánea. Hay que fijarse que los valores de contenido de oxígeno (daf: *Dry ash free*) en aquellos carbones con mayor potencial de combustión espontánea son altos en comparación con los otros. Esto demuestra

que el contenido de oxígeno es un factor que hay que tomar en cuenta a la hora de determinar la potencialidad de un manto.

La Figura 69 muestra una comparación entre el contenido de cenizas (% base seca), la temperatura y el tiempo, donde se observa que mientras haya menos contenido de ceniza en una muestra de carbón que esté en pleno proceso de oxidación, la temperatura se elevará considerablemente hasta producirse la combustión.



**Figura 69. Curvas de autocalentamiento de muestras 1, 2, 3 y 4.**  
**Fuente: Elaboración Propia**

En este aspecto se observó que los carbones con menor contenido de materia mineral, cenizas, azufre, y mayor contenido de materia volátil, poder calorífico, tienden a ser más propensos a la combustión espontánea, específicamente los del grupo 4 y 5.

Los valores de temperaturas de ignición y de autocalentamiento son muy relativos debido a que son valores que permiten describir cada uno de los mantos por separado y establecer unos parámetros de precaución para mitigar el proceso de combustión. También son valores límites que se pueden tomar en cuenta al

momento de monitorear la zona de mina, específicamente en aquellos mantos donde es más propenso el proceso de combustión espontánea.

Las muestras usadas en la Figura 69 fueron tomadas específicamente con grandes diferencias de contenido de cenizas, precisamente para determinar la velocidad de oxidación que tienen los carbones al contener menos cantidad de cenizas que otros. La oxidación relativa y riesgo de autocalentamiento de varios carbones, se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 21. Tasas comparativas de oxidación y calentamiento de carbones por su rango.**

<b>RANGO DEL CARBON (Clasificación US)</b>	<b>% CARBONO</b>	<b>TASA RELATIVA DE OXIDACIÓN A 100°C</b>	<b>TASA RELATIVA DE AUTOCALENTAMIENTO A 100°C</b>
Bituminoso			
Bajo volátil	90-91	1.0	0.5
Medio volátil	88-90	1.6	-
Alto volátil A	82-87	2.0	1.7
Alto volátil B	80-83	5.8	6.1
Alto volátil C	79-80	12	8.5
Sub-bituminoso			
A	77-79	20	14
B	75	47	28
C	70-74	68	12
Lignito	73	240	51

**Fuente: Cliff, (1992)**

Se observa que los carbones de fosa Baqueta tienen valores relativamente altos para las tasas de oxidación y autocalentamiento, tomando en cuenta que a la temperatura de 100°C un grado más influye bastante en el proceso, ya que estaría influenciado por otros factores, como son las técnicas mineras, los factores geológicos, los factores estructurales, los factores hidrológicos, etc.

## **CAPÍTULO VII. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE AUTOCOMBUSTIÓN DE CARBÓN**

En esta parte se indican los pasos a seguir para obtener un mejoramiento en las operaciones de explotación del carbón, sin pérdidas de material y sin problemas de salud ambiental en las zonas adyacentes al área minera, provenientes de los impactos ambientales negativos por causa de contaminación atmosférica. También se definen los pasos a seguir para rehabilitar un área que haya sobrepasado el proceso de combustión, así como también el buen manejo de las pilas de almacenamiento, para evitar el proceso de oxidación. Para finalizar se da a conocer un simulador mediante programación numérica con el cual se puede evaluar cada manto individualmente, ingresando información, y obteniendo la potencialidad de combustión espontánea.

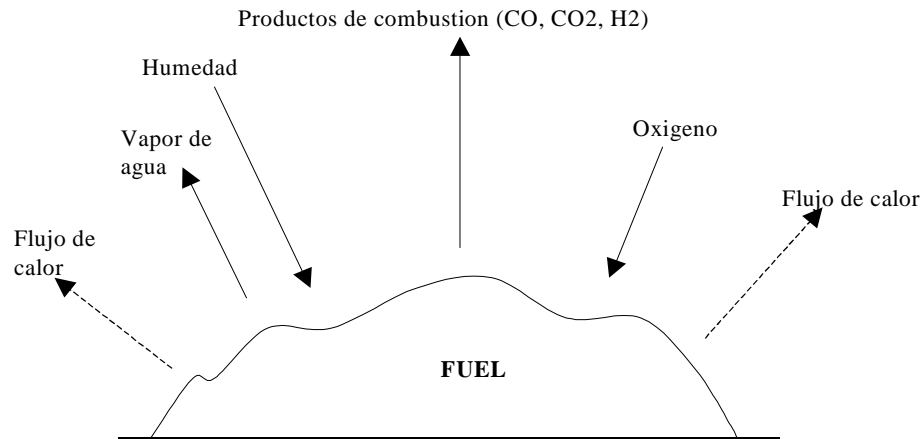
### **7.1 PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN EN MANTOS DE CARBÓN**

#### **7.1.1 Consideraciones generales**

Existen una cantidad de factores críticos que deben ser conocidos por las operadoras de carbón, para así prevenir futuros procesos de combustión espontánea. Estos factores involucran las propiedades del carbón: son aquellos carbones con alto contenido de materia volátil, alto contenido de humedad, alto contenido de pirita, alto contenido de vitrinita; y también involucra los rasgos geológicos: son aquellas zonas donde existan mantos gruesos ( $> 2\text{m}$ ), presencia de agua, presencia de fallas, etc.

Durante la oxidación, la tasa en la cual el calor es generado depende de las variables tales como el tipo de carbón involucrado, el tamaño de la partícula, la concentración de oxígeno en el aire, el contenido de humedad del carbón, la atmósfera que la rodea, y la temperatura del ambiente. Los flujos involucrados, química, calor, humedad y productos de combustión, son ilustrados en la Figura 70.

**Figura 70. Principales flujos químicos y físicos durante el autocalentamiento del carbón**



**Fuente: Postrzednik, (1997)**

El proceso de oxidación también depende, en una gran magnitud, de la disponibilidad de cantidades adecuadas de aire. La velocidad del flujo de aire es también importante, ya que altas velocidades ayudan a remover el calor generado por la oxidación, mientras que el aire estancado rápidamente se volverá inerte.

Es muy conveniente conocer las fases por las que pasa el proceso de combustión espontánea. Se sabe que las primeras fases proceden lentamente y el nivel de calentamiento es pequeño. Sin embargo, si el calor generado durante este proceso y la fuente de oxígeno no son eliminados, entonces otras reacciones se pueden volver dominantes, y finalmente puede resultar el fuego. Al carbón de fosa Baqueta en mina Paso Diablo se le realizó medidas de temperaturas superficiales, donde arrojó valores en un rango de 80-100°C, esto refleja que el manto está en pleno de proceso de combustión espontánea, debido a lo alto de la temperatura. A este nivel de calor, se producen muchas emisiones de gases, tales como CO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>S, que son muy contaminantes para el ambiente.

Según Das y Hucha (1986) que señalan que el calor de mojado para carbones bituminosos de alto volátil, como es el caso de los carbones de la fosa Baqueta, está por el orden de 10-15 cal/g, se determina que el uso de agua para controlar la temperatura es considerada una práctica poco usada y realmente

puede promover el calentamiento. Esta práctica es generalmente considerada inefectiva e innecesaria. Excepto en situaciones extraordinarias, el uso del agua para controlar la temperatura no es recomendada y debería ser activamente descartada.

### **7.1.2 Mantos sellantes**

Existen numerosos productos químicos sellantes que tienen como función cortar el ingreso de oxígeno a la fumarola, esto hace que se sofoque el fuego y por consiguiente que se apague. A continuación se nombran algunos que pueden ser usados para prevenir la combustión espontánea en los mantos de carbón.

La compañía *Goodson & Associates* ([www.goodsonassociates.com](http://www.goodsonassociates.com)) ha desarrollado una mezcla de cemento denominada *Thermocell*. Esta es una célula material cementosa comprendido de cantidades selectivamente proporcionadas de cemento *Portland*, ceniza fina, agua y espuma, que mezcladas forman un producto sólido resistente al alto calor. Este es seguro para el ambiente, no contaminante y se usa para controlar fuegos en mina de carbón. *Thermocell* ayuda a cortar el suministro de oxígeno al fuego, enfriando toda la superficie del carbón. Además, la mezcla de cemento puede ser bombeada a largas distancias. *Thermocell* puede ser usada para suprimir fuegos de carbón aplicándose directamente al material en llamas a través de barrenos, fracturas o vetas. Es probado que la aplicación de *Thermocell* es eficiente para extinguir fuegos en afloramientos de carbón, y pilas de almacenamiento de carbón, por medio del sellado, enfriamiento y privación de oxígeno, con un alto grado de seguridad ambiental.

Existen muchas sustancias que logran el objetivo de impedir el contacto con el aire, pero algunas son muy costosas y otras con el tiempo o con la lluvia pierden facultades. Es por eso que también se recomienda el siguiente producto ya que ha sido probado en minas, con características químicas y técnicas iguales a la de Mina Paso Diablo.



La suspensión EM-01® o equivalente es un producto altamente humectante y de fácil aplicación. Esta suspensión al ponerse en contacto con el carbón encendido evapora rápidamente el agua dejando una partícula de sal inorgánica, que debido a las altas temperaturas de la superficie, se descompone y genera CO<sub>2</sub> que actúa como sofocante de la llama, y el CO<sub>2</sub> se elimina. Además, la suspensión EM-01® o equivalente es altamente humectante logrando penetrar en las fisuras, macroporos y microporos del carbón. Disminuye sustancialmente el ángulo de contacto y reduce la tensión interfacial sólido-líquido de 126 miliNewton/metro a 42 miliNewton/metro, cuando se usa en las concentraciones adecuadas (entre 0,5 y 5% con respecto a la cantidad de carbón).

El proceso de humectación está controlado por la tensión interfacial entre el carbón, el líquido y el aire. Una medida de esta tensión es el ángulo de contacto que aparece cuando una gota de EM-01® o equivalente es depositada sobre la superficie pulida del carbón.

El Lodo PHE-03® o equivalente (Sellante provisional) es un lodo en suspensión con humectantes y emulsificantes. Sus propiedades reológicas permiten que sea bombeado y aplicado por aspersión sobre el manto de carbón.

El lodo PHE-03® o equivalente al ponerse en contacto con carbón caliente enfría y sella haciendo una barrera provisional al paso del aire hacia el interior de los mantos de carbón. Este sello permite dejar en observación, por algunos días, el área del incendio tratado hasta determinar que el fuego ya no exista. Este tiempo de observación es importante; se ha encontrado en la práctica que existen focos de combustión profundos que reciben oxígeno por fisuras de mantos adyacentes. Es fundamental un sello final con IMPERCOL-20® o equivalente ya que el lodo sellante puede ser lavado por la lluvia.

El IMPERCOL-20® o equivalente (Sellante definitivo), es una eficiente emulsión asfáltica, específica, sometida a rigurosas pruebas de porosidad, lavabilidad, estabilidad térmica y elasticidad. IMPERCOL-20® o equivalente

logra el objetivo de la investigación que es la de impedir el paso de aire hacia los mantos de carbón, inhibiendo drásticamente el aporte de oxígeno a su actividad química inicial y por consiguiente la no presencia de combustión en los mismos. Su comportamiento es excelente a la intemperie, no se cristaliza, no se escurre, no se lava y no se fisura. La propiedad de no fisurarse juega un papel importantísimo en el objetivo puesto que no hay posibilidad de entrada de oxígeno al manto por resquebrajamiento.

### **7.1.3 Otras prácticas**

El relleno de los puntos calientes, usando material inerte (no carbonáceo), es raramente efectivo en la total extinción de los fuegos de combustión espontánea. Sin embargo, puede ser un rápido y relativamente económico método para ganar algún control, disminuyendo la tasa de reacción.

La inyección de nitrógeno líquido ha sido practicado en operaciones mineras para extinguir los fuegos de carbón. Una técnica poco usual que se ha tratado con algún éxito en *USA*, y que podría ser aplicada en extremas circunstancias, es el uso de una mezcla de CO<sub>2</sub> sólido (hielo seco) con nitrógeno líquido, para ser inyectada dentro de los puntos calientes.

### **7.1.4 SPONCOM: Simulador de potencialidad de combustión del carbón**

La oficina de minas de U.S. desarrolló un método de clasificación para predecir el potencial de auto calentamiento del carbón, basado en la temperatura mínima de autocalentamiento del carbón. Esta determinación es sumamente importante a la hora de los avances dentro de la fosa minera, ya que permite conocer los valores limites de temperatura de autocalentamiento y potencialidad de combustión del carbón, a las cuales tenemos que acatarnos.

Un análisis estadístico de los resultados del horno adiabático mostraron que la SHT mínima de un carbón bituminoso fue fuertemente dependiente del

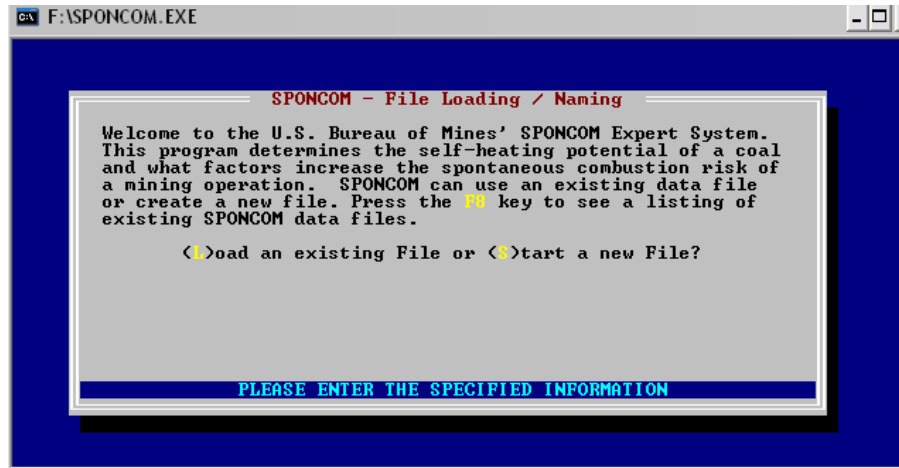
contenido de oxígeno (*daf*) del carbón, un valor disponible del análisis último (Smith, 1987). Estos resultados fueron incorporados dentro de un programa de computación experto que permite la asignación del potencial de autocalentamiento del carbón sin la necesidad de experimentos de laboratorio (Smith, 1992). El programa, sin embargo, evalúa sólo el potencial de autocalentamiento relativo del carbón, y no toma en cuenta otros factores importantes en el proceso de combustión espontánea, tales como propiedades del carbón, condiciones geológicas y mineras y practicas mineras.



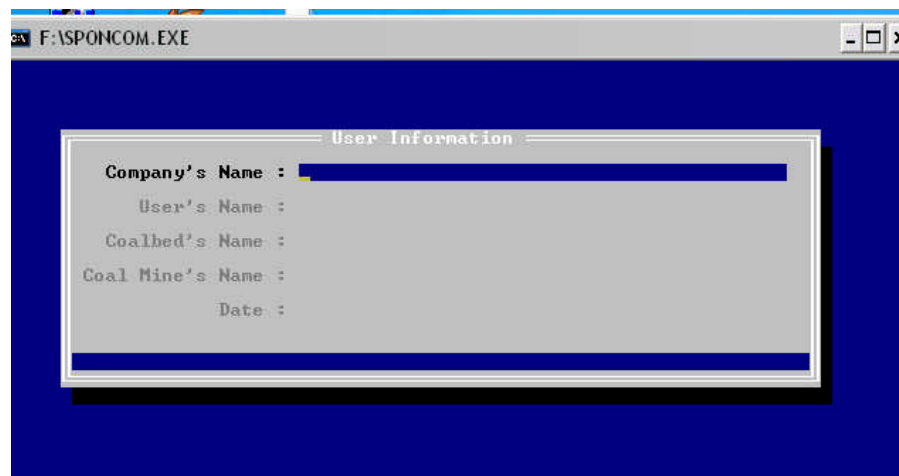
**Figura 71. Pantalla de Inicio del Programa SPONCOM**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

En la figura 71 se muestra la pantalla de inicio del programa donde se observa el nombre y los programadores encargados.

En esta pantalla, que se muestra en la figura 72, se inicia con un nuevo archivo, es decir, con una nueva información de un manto en particular, o se puede abrir un archivo que esté grabado para realizarle algún cambio.



**Figura 72. Pantalla de Carga de Nuevo Archivo o Existente**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Figura 73. Pantalla de Llenado de información**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

Luego en esta pantalla de la figura 73 se coloca la información perteneciente a la compañía, el usuario, el nombre del manto, el nombre de la fosa, y la fecha.

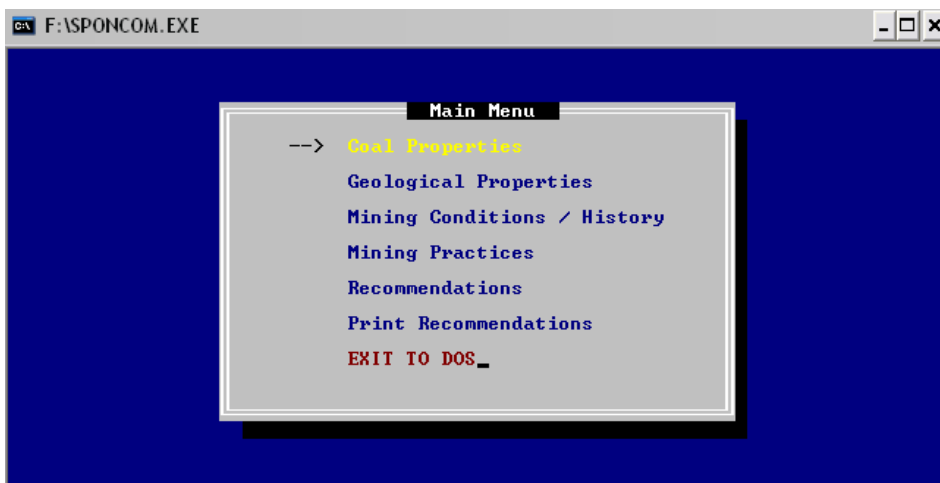


Figura 74. Pantalla de Menú Principal.  
Fuente: Elaboración propia.

En esta pantalla de la figura 74 hay que rellenar toda la información acerca de las propiedades del carbón, las características geológicas, las condiciones de operaciones mineras y el método de explotación mineral. El ingreso de información se muestra en las figuras 75-82, que se muestran a continuación:

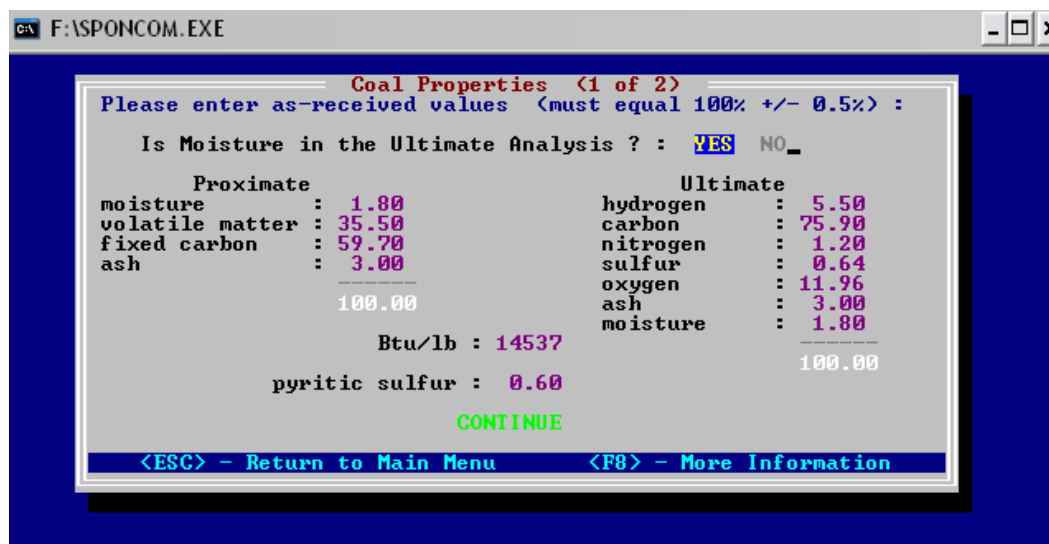


Figura 75. Pantalla de Propiedades del Carbón  
Fuente: Elaboración propia.

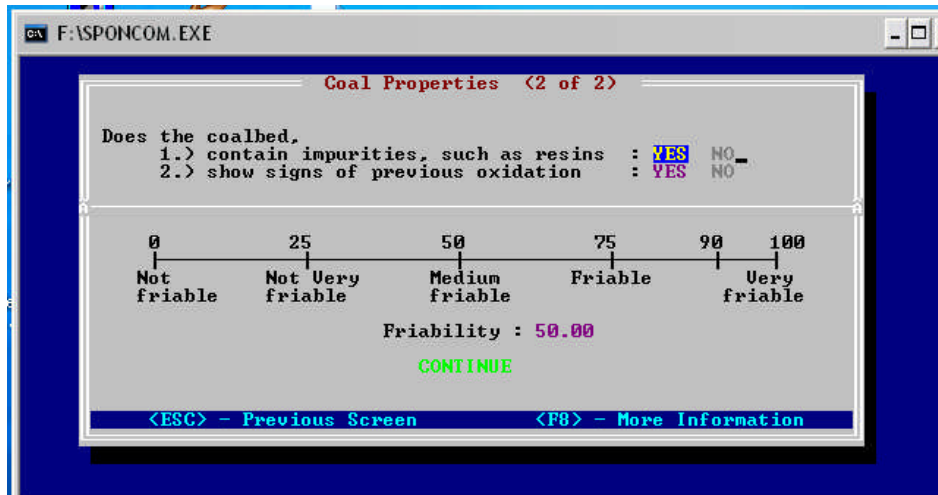


Figura 76. Segunda Pantalla de Propiedades del Carbón  
 Fuente: Elaboración propia.

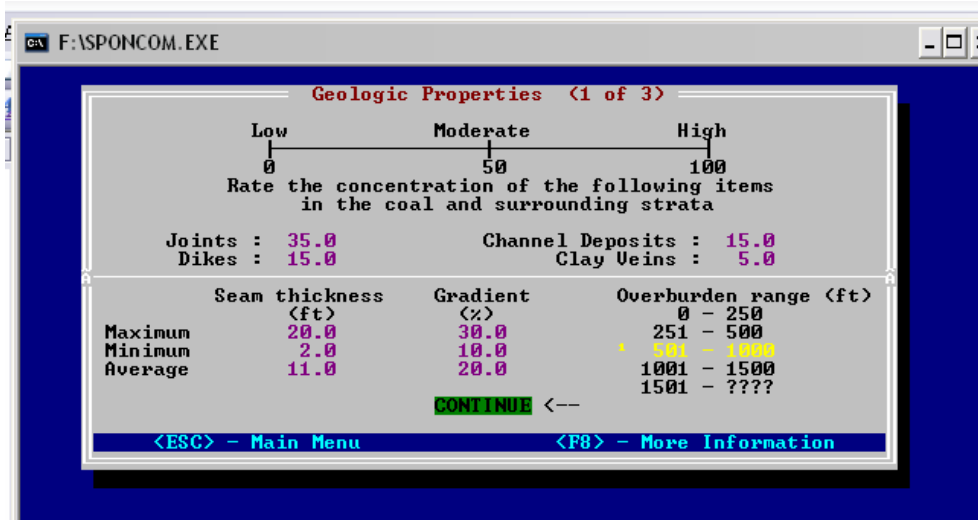


Figura 77. Pantalla para Características Geológicas.  
 Fuente: Elaboración propia.

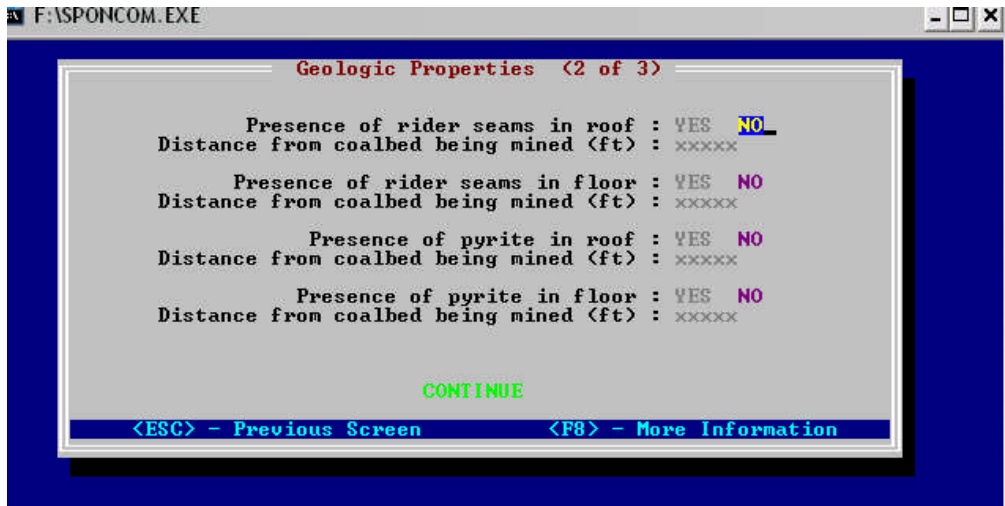


Figura 78. Segunda Pantalla para Características Geológicas.  
 Fuente: Elaboración propia.

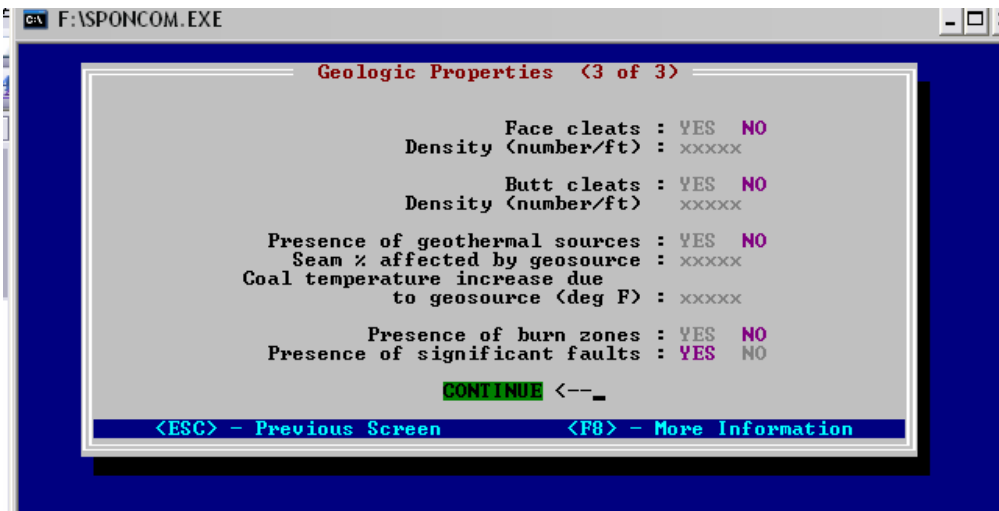


Figura 79. Tercera Pantalla para Características Geológicas.  
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 80. Pantalla de Condiciones Mineras.  
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 81. Segunda Pantalla de Condiciones Mineras.  
 Fuente: Elaboración propia.





Figura 82. Pantalla de Práctica Minera.  
Fuente: Elaboración propia.

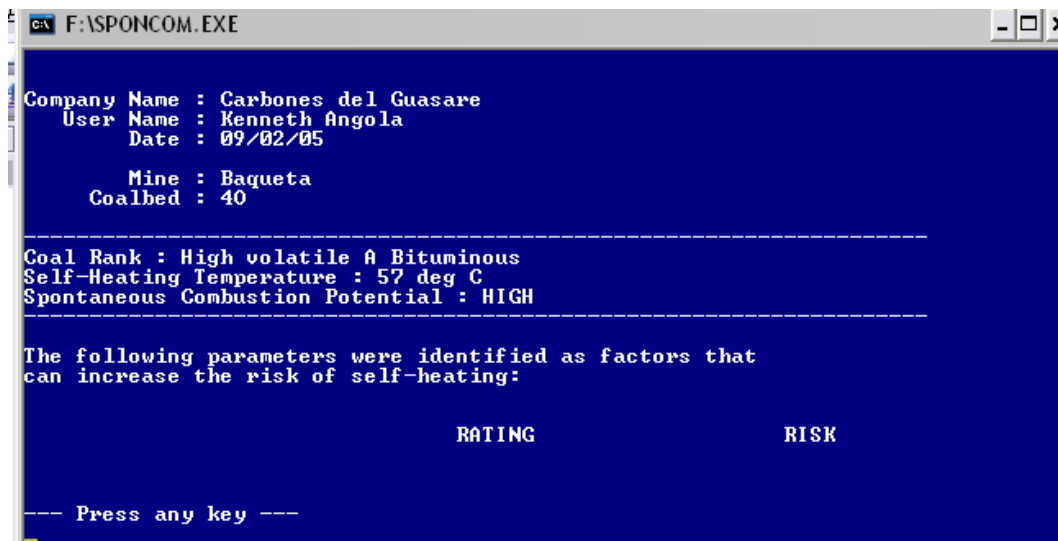


Figura 83. Pantalla donde se muestra el Resultado.  
Fuente: Elaboración propia.

En esta última pantalla, figura 83, se da el resultado del rango del carbón, la temperatura de autocalentamiento y el potencial de combustión espontánea. También se reflejan unos parámetros que son identificados como factores que pueden aumentar el riesgo de auto calentamiento. El resultado obtenido es que el manto 40 es bituminoso alto volátil y tiene una SHT de 57°C y es de alto potencial de combustión espontánea. Si se observa la tabla 20 donde se refleja las

SHTs de cada manto, se tiene que la SHT del manto 4O es de 60°C. Esto significa que el programa tiene un margen de error pequeño, y se puede utilizar para determinar valores confiables y acertivos.

## **7.2 PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN EN PILAS DE CARBÓN**

En las pilas de carbón también existe el problema de la combustión, pero es mucho más fácil controlarlo debido a su accesibilidad a los sitios con fumarolas. Este caso no ocurre con mucha frecuencia en las pilas de almacenamiento de la mina Paso Diablo, sin embargo, se ofrecen algunos datos que pueden ser útiles al momento de producirse la combustión.

El único método conocido para el control y eliminación del calor en las pilas es la compactación de la misma durante su apilamiento. Existen agentes incrustantes en uso que sellan la superficie de la pila, sin embargo son muy caros de aplicar e impráctico para una pila activa. Una pila que haya sido bien compactada puede ayudar a prevenir el movimiento libre de aire dentro de la pila, reduciendo de esta manera la oxidación.

A continuación se describen dos pasos a seguir para prevenir los puntos calientes en las pilas de carbón.

Rotación de inventario de carbón apilado: Sería del beneficio de todos los patios de carbón intentar e implementar una rotación “*first in-first out*” (FIFO) de las pilas para reducir a un mínimo el tiempo que el carbón permanece en inventario.

Supervisión de pilas de carbón: Las pilas de carbón deben ser chequeadas por lo menos una vez al día para observar signos de calentamiento, generalmente los puntos calientes emitirán vapor por varios días antes de que algún fuego activo se dé lugar. Esto permite un amplio tiempo para tomar acciones antes de que cualquier encendido del carbón ocurra, es recomendable sin embargo que los puntos calientes sean tratados cuando se desarrollan. La tardanza sólo permitirá que más carbón sea afectado.

La combustión espontánea es un proceso dependiente del tiempo. La temprana atención a fuentes potenciales del problema pueden prevenir la ocurrencia.

A continuación se ofrecen recomendaciones a seguir para cada caso:

**Escombreras** – Las escombreras deben ser tapadas con por lo menos un metro de material inerte (no carbonáceo), capa superficial y revegetada. El material problemático debe ser colocado en capas y compactado, usando un rodillo, particularmente en los bordes de las escombreras, para así minimizar la infiltración de oxígeno. La forma final debe ser tal que el escurrimiento y la erosión sean minimizadas y las nuevas áreas del carbón no estén expuestas a la atmósfera.

**Producto de carbón** – El producto de las pilas de almacenamiento no debe ser dejado mucho tiempo más que el período de calentamiento incipiente. Hay que tener cuidado particular donde haya una segregación del tamaño del material debido a las técnicas de descarga y almacenamiento de pilas. Una capa/franja de partículas de desecho en la base y bordes de las pilas permite la intensificación de la ventilación. La situación es particularmente agravante en calor prevaleciente y vientos húmedos en una dirección desfavorable, que puedan ingresar al interior de las pilas de carbón. Por esta razón, la forma y orientación de las pilas se vuelven problemas importantes. La altura de las pilas también puede ser una consideración crítica.

**Corte abierto de caras de carbón** – El carbón fracturado en las caras del talud no debe permanecer mucho tiempo expuesto. Si el carbón es propenso a la combustión espontánea, el carbón suelto se debe remover y la cara se rellena con material de desecho (no carbonáceo).

Los fuegos de mina son prontamente descubiertos por su olor distintivo. La oxidación del carbón causa una liberación de grandes volúmenes de gases nocivos e inflamables que pueden también representar un peligro, debido a la asfixia, el envenenamiento, el fuego o la explosión.

En condiciones de clima de poco viento, bajas temperaturas, poca humedad y con una buena compactación de la pila, el carbón puede permanecer en una condición estable por años. Sin embargo, el calentamiento puede ocurrir sin una supervisión adecuada de la pila en un período de 30 a 40 días, y en condiciones climáticas desfavorables, tales como los vientos fuertes.

Bajo extremas condiciones climáticas, particularmente vientos fuertes aislados, pueden ocurrir los puntos calientes sobre la superficie expuesta del carbón. Estos puntos calientes pueden estabilizarse si las condiciones climáticas mejoran. Las fuertes lluvias también pueden iniciar un calentamiento en las pilas después de unos días.

Los puntos calientes en las pilas de carbón son normalmente confinados a carbones en o cerca de la superficie de la pila, usualmente dentro de 1-2 m de la superficie de la pila. Generalmente se piensa que el primer espesor entre 0,5 y 1 m de carbón en la pila es capaz de disipar el calor al ambiente. El carbón que está dentro de 1 y 2 m de la superficie puede todavía recibir algo de oxígeno del ambiente, pero no puede disipar efectivamente el calor generado y por consiguiente el calor tiende a formarse. El carbón que está a más de 2 m de la superficie usa el oxígeno entrante, que detiene el progreso de las reacciones del calentamiento/oxidación. El oxígeno adicional no puede alcanzar el carbón más profundo y por lo tanto la reacción de oxidación es detenida efectivamente.

Es recomendable, sin embargo, si la temperatura en un punto caliente aumenta por encima de 50°C, que se deben tomar medidas para su control. Esta acción acarrea el removimiento del carbón caliente de la pila, esparciéndolo en una capa y permitiendo que se enfríe por más de una hora. El carbón puede luego volver a la pila, recompactando el área afectada para controlar cualquier calentamiento que pueda ocurrir.

Los operadores del patio de carbón deben monitorear las temperaturas en las pilas de carbón todos los días. Los carbones con temperaturas mayores de 65°C, deben ser sacados, enfriados y luego compactados de nuevo en la pila.

La base del patio de carbón no debe permitir concentraciones de agua debajo de la pila de carbón, se debe promover el drenaje del agua fuera del carbón. Los puntos calientes no deben ser tratados con agua, excepto en situaciones de emergencia. Es cierto que el agua enfría el carbón caliente, pero el agua usualmente acelera el calentamiento si ésta no es drenada fuera inmediatamente. Siempre habrá problemas cuando el agua forme piscinas debajo de la pila de carbón.

Un buen procedimiento operativo cuando se trata con carbones bituminosos, como es el caso de los carbones de fosa Baqueta, es compactar ligeramente el pie de la pila (este es, el borde del fondo exterior de la pila de carbón), la cual es susceptible al flujo de aire. La compactación de esta zona de la pila previene el flujo de aire dentro y fuera del fondo de la pila cuando ésta es más caliente o más fría que las condiciones ambientales.

Las pendientes de los taludes se deben mantener tan bajas como sea posible, 20-25 grados, sin embargo el constreñimiento de tamaños del patio de carbón puede que no permita construir taludes tan llanos. Por lo tanto, puede ser necesario usar una retroexcavadora o cargador para compactar los lados del talud, para minimizar el calentamiento. Esta técnica ha sido usada en algunos patios de carbón y ha sido efectiva en el control del calentamiento.

Para evitar una situación de pérdida de material en las pilas de carbón, es recomendable tener en cuenta los siguientes pasos:

Cuando el carbón de la pila, proveniente de fosa Baqueta, tiene humedad superficial de por lo menos 7%, el carbón tiende a exhibir baja propensión a la combustión espontánea y baja propensión de producir polvo. Por lo tanto, las

pruebas deben hacerse sobre la humedad del carbón para determinar si la humedad superficial ha bajado por debajo del 8%. Si es así, entonces se debe añadir agua a la pila para aumentar la humedad superficial a un 8-9%.

Un método ampliamente más aceptado es que el material se extienda para enfriarse y las cenizas se dispongan en un modo adecuado según sus propiedades fisicoquímicas. Se debe suministrar vestimenta protectora y máscara de respiración, para el personal, teniendo en consideración el equipo elegido a la conveniencia del trabajo en particular.

## CONCLUSIONES

La combustión espontánea todavía representa una amenaza, a nivel mundial, en todas las etapas de extracción de carbón, de transporte y de almacenamiento. Los riesgos presentados por estos fuegos incontrolables son particularmente agudos, especialmente para la calidad del aire. Este estudio puede ser considerado como un esfuerzo en la dirección de la protección ambiental más allá de las consideraciones de mercado por razón de evitar pérdidas de reserva mineral.

La localidad de las cuencas hídricas y carboníferas del río Guasare se encuentra altamente influenciada por la actividad tectónica evidenciada por las numerosas fallas presentes en la zona, trayendo como consecuencia que en aquellas zonas donde las fallas se presentan con mayor frecuencia, existe más contacto del oxígeno con los mantos de carbón, aumentando así el riesgo de combustión espontánea. Por tal razón las áreas escogidas para realizar el estudio justamente se encuentran en presencia de corredores de falla, esto se verifica en las observaciones tomadas de los bloques a ser minados en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre del año 2004 (ver anexo K).

La Zona 1 de la fosa Baqueta, ubicada en la perimetral Sur, se mantuvo en toda la fase de campo, entre octubre 2004 y abril 2005, con una tasa de avance de la combustión de  $0,5 \text{ m}^2/\text{día}$ , con dirección hacia la pendiente del talud y a la del viento, ambas Norte. Las demás zonas duraban muy poco tiempo en combustión debido a que eran controladas rápidamente por la Gerencia de Servicio de Mina, antes que se propagara el fuego.

La elevación con respecto al nivel del mar al que se encuentre el manto no es un factor incidente de combustión espontánea, debido a que los puntos calientes se formaron tanto en niveles superiores, nivel 100 msnm, como en niveles inferiores, nivel -36 msnm.

### **Con relación al factor: agua subterránea**

Los piezómetros ubicados en el límite de la pared Este indican que existe flujo de agua en el subsuelo de la fosa Baqueta, esto requiere que esta agua sea canalizada fuera de esta zona para así evitar futuros procesos de combustión espontánea del carbón.

El agua subterránea que circula dentro de la fosa Baqueta presenta un pH entre 7-10, esto significa que esta agua es incrustante porque tiene un poder de depositación de minerales alto, de tal manera que se disminuye el caudal de agua, al disminuir el diámetro libre de los poros, elevando la presión interna y permitiendo el fracturamiento del carbón y por consiguiente el ingreso del aire a otras zonas más profundas del manto de carbón. También se observa que esta agua no posee enormes cantidades de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, ya que no es ácida, siendo más bien de tendencia incrustante básica.

Los contenidos de sulfato y de hierro en las aguas subterráneas, en algunas áreas sobrepasan los límites permisibles según el Decreto 883 de calidad de agua (ver anexo D), siendo 1 mg/l y 400 mg/l, respectivamente. Esto determina que el drenaje de mina aporta cantidades de pirita que provienen de los mantos de carbón

La temperatura de las aguas subterráneas es elevada, dando valores de 25-35°C, esto influye al momento de reforzar la combustión espontánea en aquellos sitios donde se presenta de manera activa la fumarola.

### **Con relación al factor: aire**

La dirección predominante de los vientos en las estaciones El Carbón y Carichuano es hacia el Norte, con variaciones en algunos meses del año hacia el Noreste y Noroeste.

La velocidad promedio de estos vientos es de 30 km/h, y esto es continuo en el transcurso del año, siendo este factor muy importante en la contribución del autocalentamiento del carbón.



La temperatura promedio ambiental del aire en la fosa Baqueta es de 35°C, siendo alta, esto trae como consecuencia que sea un aire caliente. Este factor es muy importante ya que el aire contiene una humedad mínima relativa de 40% y máxima de casi 100%, razón por la cual está saturado de vapor de agua, y por lo tanto al ser este último absorbido por el carbón promueve la combustión espontánea.

Son muchos los gases emitidos por las fumarolas, pero sólo hay algunos que son potencialmente dañinos para la salud y para el equilibrio ecológico. El CO<sub>2</sub> es el primer gas típicamente emitido a una temperatura promedio por encima de 50°C, seguido del CO (por encima de 90°C). No obstante la concentración parcial de estos gases en ppm es pequeña debido a los pocos puntos calientes que se encuentran en la fosa Baqueta.

#### **Con relación al factor: precipitación**

Un aumento en la incidencia de fuegos normalmente, se encuentra en periodos seguidos de lluvia después de un extenso período de sequía y clima soleado. La lluvia fuerte puede resultar en la formación de canales dentro del manto, facilitando el acceso del aire que puede promover el proceso de autocalentamiento. Las precipitaciones en la Mina Paso Diablo se registran en tres estaciones meteorológicas: El Carbón, Carichuano y Dispatch. Los meses donde existen lluvias torrenciales son Septiembre, Octubre y Noviembre, con valores máximos y mínimos de 585,1 y 87,1 mm, respectivamente, en la estación Dispatch en 2004. También hay que tomar en cuenta las lluvias de los meses de Abril y Mayo, que arrojan unos valores de precipitación en la estación El Carbón de 156 mm (sólo mes de Mayo), en la estación Carichuano de 135,5 y 232 mm respectivamente y en la estación Dispatch de 127,9 y 298,7 mm respectivamente.

#### **Con relación al factor: fisicoquímicas y geoestructurales de los mantos**

Las secciones hechas en la fosa Baqueta demuestran que existen numerosas fallas y la combustión espontánea del carbón se produce donde éstas están ubicadas. De tal manera, éste es un factor crítico que hay que tomar en

cuenta al momento de determinar aquellas zonas que son más propensas al autocalentamiento del carbón.

El carbón de la fosa Baqueta de mina Paso Diablo es de tipo bituminoso alto volátil A-B, según el poder calorífico que presenta. Los mantos 4O, 4M, 5O, 5M, 6M, 7O, 7M, 8KM y 9K son los que presentan el mayor poder calorífico, en un rango de 7900 a 8100 Kcal/kg, por lo tanto son más susceptibles al autocalentamiento.

La humedad inherente juega un papel muy importante en la oxidación del carbón. Los carbones ganan o pierden humedad dependiendo de las condiciones atmosféricas. Un ambiente de aire seco puede secar parcialmente el carbón, creando sitios para la absorción y la subsiguiente generación de calor debido al efecto del calor de mojado. Los carbones de la fosa Baqueta tienen contenido de humedad inherente de 2 a 4%, siendo valores muy pequeños. Sin embargo, tomando en cuenta que la humedad relativa del aire es bastante alta, se convierte en un factor influyente al momento de producirse el autocalentamiento en cualquiera de los mantos.

El contenido de materia volátil de los carbones de fosa Baqueta, está en el rango de 30 a 35%, esto hace de la materia volátil un factor crítico que promueve al calentamiento del carbón.

El contenido de oxígeno en los mantos de carbón en fosa Baqueta es proporcional a la tasa de oxidación del mismo, los mantos 4O, 5O, 5Q, 6M y 7O tienen los respectivos contenidos de oxígeno en 11,96%; 11,97%; 11,10%; 8,68%; 11,07%. Esto hace que la tasa de oxidación del carbón en estos mantos sea alta reforzando de esta manera la combustión espontánea.

El porcentaje de cenizas en el carbón constituyó un factor determinante para el establecimiento de la velocidad de combustión de un manto. Los mantos 4O, 4M, 4M1, 5M, 6M, 7O, 7M, 9G y 11M con valores de contenido de cenizas

respectivos de 3,00%; 3,03%; 4,44%; 4,80%; 4,73%; 3,45%; 3,88%; 3,30% y 3,46%; tienen una mayor tasa de combustión por tener poco contenido de cenizas.

Es importante conocer el contenido de pirita en los mantos de carbón, ya que es un factor promotor de la combustión espontánea. En la fosa Baqueta, se obtuvieron valores de 0,84%; 1,49%; 0,77% y 0,86% correspondientes a los mantos 4O, 5O, 6M y 7M, respectivamente. El manto 5O posee un contenido de pirita alto, promoviendo así al autocalentamiento del carbón. Dado que los valores son muy pequeños, entonces el contenido de pirita es un factor de menor incidencia en la propagación del autocalentamiento del carbón.

De los datos obtenidos de los análisis granulométricos, producto de la reducción mecánica del mineral, se observó la considerable generación de finos de carbón, aproximadamente un 30%. Se obtuvo una relación de reducción de tamaño de 15:1 tomando en cuenta que el tamaño de las muestras de mano, fue de 15-20 cm y que el tamaño máximo de partículas para la trituración primaria fue de  $\pm 18$  mm,. Esto indica que el carbón en fosa Baqueta tiene un porcentaje de friabilidad de 50%, siendo así más vulnerable a la reducción de tamaños, por esfuerzos mecánicos desde los equipos mineros y las voladuras, y por lo tanto más susceptible al autocalentamiento.

Los análisis petrográficos en los carbones en fosa Baqueta, dieron resultados de vitrinita, exinita e inertinita de 70%, 7% y 20%, respectivamente. Esto demuestra que estos carbones tienen facilidad de autocalentarse. La reflectancia de la vitrinita se encuentra en el rango de 0,6 a 0,7%, esto se encuentra reportado en los mantos 4O, 5O, 6M y 7M. Este porcentaje de reflectancia de vitrinita al hacer contacto con el oxígeno refuerza la oxidación, pero por sí solo no logra llegar a tal temperatura como para que se produzca la autocombustión del carbón.

### **Con relación al factor: análisis de riesgo de autocombustión**

La temperatura de ignición de los mantos está por el rango de 160 a 165°C, esto significa que el contenido de materia volátil de los carbones no difiere mucho, concluyéndose que es un factor importante al momento de conocer la capacidad de autocombustión del carbón.

Los umbrales de T de los mantos 4O, 5O, 5Q y 7O son más autosostenibles, según las temperaturas de autocalentamiento, que son: 60,76°C; 60,70°C; 66,44°C y 66,64°C; respectivamente, en comparación con los demás grupos de mantos que son muy altas. Esto significa que estos mantos al sobrepasar estos límites su calentamiento se produce rápidamente siendo difícil de controlar, provocando así el proceso de combustión del carbón. Esto no quiere decir que los demás tienen menor propensión a autocombustionarse, sino que pueden aguantar más calor para llegar al punto de autocalentarse.

### **Con relación a equipos de detección de fumarolas**

Existen formas de detectar fumarolas, por medio de la identificación de los olores y el monitoreo de las temperaturas de los mantos. En el mercado existe una gran variedad de equipos para monitoreo de emisiones de gases, en unidades ppm, y cámaras termográficas que imprimen fotos donde señalan las temperaturas superficiales y subterráneas de la zona. Con esta información se previene de la situación y se corrige antes del comienzo del proceso de autocombustión.

## RECOMENDACIONES

### Generales

- El proceso de combustión espontánea del carbón debe ser tratado no sólo durante y luego de la explotación, sino incluso antes de la misma, mediante la planificación de medidas de precaución dirigidas a evitar en lo posible la creación de condiciones físicas que lleven a un incremento de la propensidad.
- En la nueva fosa que se está abriendo en la zona Noroeste, se recomienda conocer más detalladamente la geología estructural, para así determinar donde se encuentra el corredor de fallas y evitar el ingreso de aire por esas aberturas.
- Eliminar por completo el suministro de agua en la fumarola ubicada en el Sur (Zona 1), y comenzar los preparativos para el abastecimiento de lodo que va a incrustarse por todas las grietas, sacando así todo el oxígeno, para comenzar el sofocamiento completo de la zona. Después de esto es recomendable sellar definitivamente el área ya que no se va a minar.
- Los vientos tienen dirección predominante hacia el Norte, conociendo éste dato se debe evitar el contacto del aire con los mantos de carbón por medio de una barrera, puede ser una escombrera que desvíe la dirección del viento. Para las pilas es recomendable que se apilen de forma que el viento no impacte frontalmente, sino que fluya por los lados de la pila.
- Tomar previsiones en los meses de cambio de clima, de lluvia a sequía, evitando el contacto del aire caliente en los mantos de carbón, y mantener el carbón aflorado en una humedad siempre estable, sin cambios repentinos. Evitar en lo posible poner en contacto carbones mojados con carbones secos, esto en el caso de las pilas, ya que los fuegos ocurren en la interfase entre carbones mojados y secos.
- Colocar piezómetros en la pared Este donde se está abriendo la próxima fosa, para así conocer los niveles de agua que se encuentran por esa zona y canalizarla fuera para evitar el contacto con los mantos.

- Evitar el sobretiturado del carbón por medio de los equipos pesados, ya que esto genera mucho material fino y por lo tanto existen mayores posibilidades de que se produzca una combustión espontánea, y por consiguiente promueven el movimiento de partículas sólidas y producen contaminación ambiental.
- Se recomienda la realización de análisis bacteriológico a las muestras de carbón de aquellos mantos donde se presenta frecuentemente el problema de la combustión espontánea. Comenzar por las bacterias de la familia de las termofílicas que son las más frecuentes en este tipo de mineral. Esto se haría con el propósito de mejorar el diagnóstico y fortalecer más el estudio de combustión espontánea del carbón.
- Realizar una planificación de explotación tomando en cuenta que no se debe dejar una cara libre de los mantos de carbón tanto tiempo en descubierto. Si ese fuera el caso entonces se recomienda cubrir con una capa de algún lodo o material escoria que no sea carbonáceo.
- La planificación de la voladura debe contener un adecuado factor de carga, ya que al sobrepasarse éste la voladura crea una onda expansiva que golpea al carbón y lo fractura, haciendo así posible cualquier admisión de aire.
- El uso de agua para controlar la temperatura es considerada una mala práctica y puede efectivamente promover el calentamiento. El uso del agua no es recomendado y debe ser activamente descartado.
- Ofrecer información sobre este proceso de autocombustión en las charlas de seguridad industrial, para que se tengan en cuenta los factores que promueven este proceso y los peligros que resultan. Con esto mantendremos una supervisión continua y así se eliminará con el tiempo este problema.

#### **Plan de supervisión**

- Continuar con el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, específicamente en las zonas cercanas a la fosa Baqueta, ya que algunos parámetros presentan valores mayores que los permisibles, y esto causa trastornos a la hidrósfera.

- Se recomienda realizar lecturas semanales de temperatura de mantos para evitar posibles nuevos puntos calientes, esto se debe hacer con la ayuda de las temperaturas de ignición calculadas para cada manto. En aquellas zonas donde existan fumarolas, tratar en lo posible de sofocar el fuego. Esto se hace cerrando todo abastecimiento de oxígeno.
- Realizar mediciones de calidad de aire tres veces por semana, por medio de los equipos Micro Pac Drager®, para determinar las concentraciones en ppm de CO y H<sub>2</sub>S, que son dos de los gases más contaminantes de la atmósfera.
- Con el uso de la Rosa de Vientos aplicada a Fosa Baqueta, para monitorear la distribución y frecuencia de las fumarolas en el tiempo, llevar un registro de las direcciones y velocidades de éstos para determinar si existe algún patrón o si no es el caso entonces tomar en cuenta las direcciones predominantes.
- Al finalizar cada proceso de voladura se debe realizar un recorrido en la zona volada para visualizar el color de los gases de la voladura y determinar si hubo contacto de la onda expansiva con los mantos de carbón para inspección por sobrefacturación y reducción de tamaño de particulado.
- Diariamente el personal obrero de la Mina Paso Diablo, al realizar el cambio de turno, debe entregar al personal del siguiente turno un registro de los factores más visibles del proceso de combustión, como: el color de los gases, los olores, si existen puntos calientes indicar hacia que dirección se dirige, movimientos de tierra, deslizamientos de los taludes, etc.

### **Plan de manejo**

- En los mantos de carbón donde exista combustión se debe proceder a sofocar el fuego por medio de un mortero, inyectando dentro de las aberturas material *thermocell*® para apagar el fuego.
- En estos casos se puede ayudar con el agua después de haber extinguido por completo el fuego, pero siempre tomando en cuenta que el agua no debe quedar estancada.

- Luego se debe sellar el manto, temporalmente o permanentemente, según sea el caso. Existen numerosos productos que sirven para cumplir ese objetivo, como las espumas, los mantos naturales, que son capas de material vegetal (plantas), material estéril (no carbonáceo) y otros.
- Se recomienda monitorear esa zona diariamente para detectar cualquier propagación o reinicio del mismo.
- En las pilas de remanejo se recomienda remover el material en combustión y expandirlo en un área, apagarlo por medio de agua y dejarlo secar por dos días. Luego se puede colocar de nuevo en la pila pero tomando en cuenta que tengan un porcentaje de humedad equivalente.
- Con el uso de termocuplas realizar mediciones de temperatura en las pilas de carbón, con una profundidad de 2 a 3 m, para detectar posibles puntos calientes.
- Colocar pantallas vegetales (cortaviento) para desviar la dirección de los vientos y evitar el contacto directo del aire con las pilas de carbón.
- Mantener el nivel de humedad del carbón en un rango de 8%, esto se hace por medio de riego periódico de las pilas con agua.

### **Integración de criterios de protección ambiental**

- Consolidar los esfuerzos para producir información ambiental, informes de la situación de factores ambientales e indicadores ambientales con el fin de fortalecer la toma de decisiones y la información pública.
- Fortalecer la educación y conciencia ambiental con una estrategia de aprendizaje ambiental de largo plazo.
- Aumentar el empleo en el sector de la protección ambiental, con atención especial al patrimonio cultural y material como base para el desarrollo sustentable.
- Evaluar las posibilidades de introducir instrumentos de la economía ecológica para la prevención de impactos ambientales por efectos de autocombustión del carbón en sitio y en pilas además de otros efectos negativos en la calidad positiva de factores ambientales.



## BIBLIOHEMEROGRAFÍAS

- Banerjee, S.C. (1985).** Spontaneous combustión of coal and mine fires. A.A. Balkema. 157 p.
- Bonezzi, M. (1984).** Estudio Petrográfico de la Cuenca Carbonífera del Guasare Estado Zulia. INZIT-CICASI. Venezuela. 16 p.
- Carras J.N. y Young B.C. (1994),** Self-heating of coal and related materials: models application and test methods. Progress in Energy and Combustion Science. Australia. 20 p.
- Castillo, Maria Cecilia (2001).** Estudio Científico de la Oxidación del Carbón mediante desorción de Productos y la Influencia de la Oxidación sobre las Propiedades Físicas. Tesis. Inédito. Universidad Simón Bolívar. Escuela de Química. Venezuela.
- Chakravorty R.N. y Kolada R.J. (1988).** Prevention and control of spontaneous combustion in coal mines. Mining Engineering. Littleton. 956 p.
- Chang, Sandra y Sequera, Mariano (2003).** Efecto de la Oxidación Ambiental del Carbón sobre su Contenido de Azufre. Tesis. Inédito. La Universidad del Zulia. Escuela de Ingeniería Química. Venezuela.
- Cliff, D. (1992).** Early detection and monitoring of fires and heatings in coal mines. Queensland Government Mining Journal. Australia. 93 p.
- Considine, D. (1986).** Tecnología del Carbón. Publicaciones Marcombo S.A. México. 245 p.
- Cuenca, Juan Carlos (1988).** Recuperación y Enriquecimiento por el Método de Flotación de Finos de Carbón de la Mina Paso Diablo, Guasare, Edo.

Zulia. Tesis. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Minas. Venezuela.

**Das y Hucka (1986).** Control of Spontaneous Combustion of Coal Through an Analysis of its Mechanism and the Affecting Factors. Society of Mining Engineers of AIME. New Orleans. 301 p.

**Díaz, Nelson y García, Eloy (2003).** Modelo Geoquímico del Proceso de Combustión Espontánea en los Carbones de Formación Marcelina, Edo. Zulia. Tesis. Inédito. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. Departamento de Geología e Hidrocarburos. Venezuela.

**Escobar, M. y Martínez, M. (1993).** Características geoquímicas y petrográficas de los principales yacimientos carboníferos venezolanos. Interciencia, Vol. 18, Pág. 62-70.

**Fernández, E. (1965).** Preparación Mecánica de Minerales y Carbones. 3era Edición. Editorial Dussat. España. 173 p.

**IEA Coal Research (1999).** Uncontrolled Fires in Coal and Coal Wastes. Putney Hill. United Kingdom. 80 p.

**IEA Coal Research (1999).** Management of Coal Stockpiles. Putney Hill. United Kingdom. 75 p.

**Instituto Tecnológico Geominero de España (1992).** Fuegos en Minas de Carbón. Madrid. España. 171 p.

**Jaspe, Sixto (2002).** Evaluación de la Minería del Carbón en los Estados Zulia y Falcón para la Creación de Distritos Mineros Sustentables. Tesis. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Minas. Venezuela.

**Kreulen, D.J. (1952).** Elementos de Química del Carbón. Ediciones Aguilar S.A. Madrid. España. 185 p.

**Krevelen, D. W. (1961).** Coal. Eljevier Publishing. Amsterdam. Holanda. 93 p.

**Keller, E. (1996).** Environmental Geology. Seventh Edition. Prentice Hall. New Jersey. U.S.A. 376 p.

**López, V. (1989).** El Carbón Mineral. Consejo Nacional de la Industria del Carbón. Caracas. Venezuela. 259 p.

**Madisetti, R. (1991).** Mine Disasters and Mine Rescue. A.A. Balkema/Rotterdam. India. 196 p.

**MARNR, Zulia (2004).** Control de la Calidad del Aire en la Mina Paso Diablo, Edo. Zulia, Informe Anual. Editorial MARNR. Venezuela.

**Torón Villegas, L. (1948).** El Problema del Polvo de Carbón en las Minas. Investigaciones Industriales del Banco de México. México. 267 p.

**UNESCO (1995).** Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología. Vol I. 157 p.

**van Vuuren M.C. (1995).** Guidelines for the prevention of spontaneous combustion of coal during storage and transport. Ministry of Mineral and Energy Affairs. South Africa. 55 p.

**Web Sites:** (visitadas entre los meses de Noviembre y Marzo del año 2004)

- <http://www.metts.com.au>

- [http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic\\_old/car12\\_02.htm](http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/car12_02.htm)

- <http://www.mme.state.va.us/DMR/DOCS/MinRes/COAL/glos.html>
- [http://64.233.161.104/search?q=cache:uYLDUm8Jxk8J:www.ingemmet.gob.pe/biblioteca\\_virtual/inifm/inf\\_sobre\\_coque.pdf+combustion+espontanea+del+carbon+en+venezuela&hl=es](http://64.233.161.104/search?q=cache:uYLDUm8Jxk8J:www.ingemmet.gob.pe/biblioteca_virtual/inifm/inf_sobre_coque.pdf+combustion+espontanea+del+carbon+en+venezuela&hl=es)
- [http://www.iespana.es/natureduca/geol\\_petrograf\\_rocasexog5.htm?](http://www.iespana.es/natureduca/geol_petrograf_rocasexog5.htm?)

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### METODOLOGÍA EN LA PREPARACIÓN DE PASTILLAS, PARA EL ANÁLISIS PETROGRÁFICO DE LOS MACERALES

#### A.- Preparación de la pastilla

- 1.- Tomar una muestra representativa de carbón molido, cernirlo con la malla 3 y tomar la porción inferior de manera que se trabaje con el pasante.
- 2.- Pesar una cierta cantidad de carbón y de polietileno que permita que un 60% de la superficie de la pastilla sea carbón.
- 3.- Mezclar el polietileno y el carbón e introducir la mezcla en el molde cilíndrico.
- 4.- Introducir el pistón que ajusta dentro del molde. El conjunto se introduce en la prensa.
- 5.- Colocar la camisa térmica alrededor del molde e introducir el termómetro para el control de temperatura.
- 6.- Aplicar presión hasta un máximo de 4.000 psi (*pounds per square inch*)
- 7.- Aplicar presión nuevamente cuando la temperatura alcance un valor de 120 °C.
- 8.- Retirar la camisa térmica cuando la temperatura sea de 160 °C y dejar enfriar el molde.
- 9.- Sacar la muestra una vez frío el molde.

#### B.- Desbaste de la pastilla

- 1.- Conectar la máquina desbastadora.
- 2.- Conectar el agua que actúa como lubricante.
- 3.- Aplicar presión sobre el papel de carburo de silicio N° 400, durante 3 minutos.
- 4.- Aplicar presión sobre el papel de silicio N° 600, durante 3 minutos.
- 5.- Lavar la pastilla.

#### C.- Pulitura de la pastilla

- 1.- Colocar el fieltro para la máquina pulidora con alúmina, de 1 mm de diámetro y pulir la pastilla, durante 3 minutos.

- 2.- Ídem a lo anterior pero usando alúmina de 3 mm.
- 3.- Ídem a lo anterior pero usando alúmina de 5 mm.
- 4.- Lavar muestra con agua destilada.
- 5.- Colocar la muestra en un desecador hasta el momento del análisis bajo el microscopio.

## **OBSERVACIÓN AL MICROSCOPIO**

### **A.- Conteo de Macerales**

- 1.- Conectar la lámpara de iluminación de campo total.
- 2.- Colocar el ocular con red impresa.
- 3.- Elegir los puntos sobre la red que se van a tomar en cuenta durante el conteo.
- 4.- Correr la muestra de 0,5 en 0,5 mm en sentido horizontal.
- 5.- Correr la muestra en sentido vertical.
- 6.- El conteo termina al haberse realizado 100 mediciones.

## **MEDICIÓN Y METODOLOGÍA DE LA REFLECTANCIA DE LA VITRINITA**

La medición de la reflectancia de la vitrinita es el análisis esencial para la determinación del rango de la materia volátil, así como la clasificación del tipo de carbón y conocer si hay cantidad suficiente como para predecir el proceso de combustión espontánea.

- 1.- Colocar en el ocular la cruz de hilo.
- 2.- Conectar la lámpara de medición y esperar que se estabilice la fuente.
- 3.- Reducir la iluminación del campo mínimo y fijar el diafragma de trabajo.
- 4.- Calibrar el galvanómetro mediante el uso de estándares.
- 5.- Colocar la muestra y calibrar el objetivo.
- 6.- Colocar en el campo, Vitrinita.
- 7.- Obturar la visión de Visoflex.
- 8.- Girar la muestra 360°.
- 9.- Tomar el valor máximo registrado.

10.- Repetir el proceso, aproximadamente entre 70 a 100 medidas.

### **EVALUACIÓN DE LA REFLECTANCIA DE LA VITRINITA**

La reflectancia de la vitrinita se determina según la técnica de un solo rayo y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RV_i = R_s (AV_i/AS)$$

Donde:

$RV_i$  = Reflexión de la vitrinita en % R

$R_s$  = Reflexión de la sustancia estándar.

$AV_i$  = Deflexión del galvanómetro

$AS$  = Deflexión por la sustancia estándar.

Las medidas sucesivas requeridas para la determinación de rango de una muestra se evalúan estadísticamente. Primero se clasifican en grupos, cada grupo es un rango de reflexión. Además se hace un reflectograma indicando la frecuencia de las mediciones.

De los valores medidos, se calcula el rango máximo y el rango mínimo, para obtener el contenido de materia volátil y carbono vitrinita y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$2S = 2 [n/100*(n-1)] * [ \sum (R_i^2 * X_i) - 100 R^2 ]^{1/2}$$

Donde:

$n$  = Número de mediciones

$R_i^2$  = Valor promedio de la reflexión promedio.

$X_i$  = Frecuencia relativa de los valores en la mitad del tipo de vitrinita.

$R$  = Valores promedio de la reflexión promedio



## ANEXO D

### CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES ADYACENTES AL ÁREA DE EXPLOTACIÓN MINERA OCTUBRE 2004

<b>PUNTO A</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo Permissible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	19,65	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	373,42	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	455,57	no fija límite
Calcio, mg/l	112	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	0,026	no fija límite
Cloruros, mg/l	141,11	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	2400	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	3100	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	1,4	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	3,02	60
DQO, mg/l	48	350
Dureza Calcica, mg/l	280	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	182,31	no fija límite
Dureza Total, mg/l	462,31	500
Nitratos, mg/l	2,2	
Nitritos, mg/l	0,011	
Sodio, mg/l	93,13	200
Solidos Totales Disuelto, mg/l	668	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	776	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	12,6304	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	13,5368	no fija límite
Turbidez, UNT	4	5
Aluminio, mg/l	0,0024	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,00445	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,1	no fija límite
Hierro, mg/l	0,0839	1
Índice de Langelier	0,1536	no fija límite
Magnesio, mg/l	47,4	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,1154	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,022	0.05
Potasio, mg/l	1,0093	no fija límite
RAS	1,85	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	56,66	400
Zinc, mg/l	0,0193	5
pH	7,3	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	5,27	> 3
Conductividad, ohm/cm	952	1700
ORP	206	
Temperatura, oC	25,95	no fija límite

<b>PUNTO B-1</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	19,65	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	334,12	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	359,8	no fija límite
Calcio, mg/l	176	no fija límite
Carbonatos, mg/l	23,58	no fija límite
Caudal, m3/h	0,1691	no fija límite
Cloruros, mg/l	61,73	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	240	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	460	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	0,6	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	1,38	60
DQO, mg/l	20	350
Dureza Calcica, mg/l	440	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	193,07	no fija límite
Dureza Total, mg/l	633,07	500
Nitratos, mg/l	1,7	
Nitritos, mg/l	0,09	
Sodio, mg/l	40,76	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	1108	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	1280	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	14,2402	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	14,8812	no fija límite
Turbidez, UNT	3	5
Aluminio, mg/l	0,1323	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,011	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	< 0.10	no fija límite
Hierro, mg/l	0,7703	1
Indice de Langelier	2,67	no fija límite
Magnesio, mg/l	50,2	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,023	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,0308	0.05
Potasio, mg/l	6,56	no fija límite
RAS	0,6941	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	279,43	400
Zinc, mg/l	0,0178	5
pH	9,25	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	8,08	> 3
Conductividad, ohm/cm	1577	1700
ORP	149	
Temperatura, oC	32,04	no fija límite

<b>PUNTO C</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	19,65	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	235,85	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	239,79	no fija límite
Calcio, mg/l	618	no fija límite
Carbonatos, mg/l	23,58	no fija límite
Caudal, m3/h	0,3122	no fija límite
Cloruros, mg/l	120,53	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	0	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	240	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	< 0.50	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	1,22	60
DQO, mg/l	32	350
Dureza Calcica, mg/l	1545	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	624,61	no fija límite
Dureza Total, mg/l	2169,61	500
Nitratos, mg/l	12,1	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	8,1	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	79,55	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	4244	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	4640	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	44,3832	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	48,0305	no fija límite
Turbidez, UNT	4	5
Aluminio, mg/l	0,0021	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,00783	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,1	no fija límite
Hierro, mg/l	0,1012	1
Indice de Langelier	2,97	no fija límite
Magnesio, mg/l	162,4	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,6992	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,04314	0.05
Potasio, mg/l	14,37	no fija límite
RAS	0,7326	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	1741,93	400
Zinc, mg/l	0,0141	5
pH	9,4	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	7,45	> 3
Conductividad, ohm/cm	5359	1700
ORP	160	
Temperatura, oC	32,35	no fija límite

<b>PUNTO MARNR-1</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	0,33	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	39,31	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	727,2	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	791,19	no fija límite
Calcio, mg/l	240	no fija límite
Carbonatos, mg/l	47,17	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	244	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	1100	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	2400	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	1,2	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	7,44	60
DQO, mg/l	56	350
Dureza Calcica, mg/l	600	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	270	no fija límite
Dureza Total, mg/l	870	500
Nitratos, mg/l	0,96	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,1	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	161,04	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	1671	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	1996	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	26,775	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	24,9293	no fija límite
Turbidez, UNT	7	5
Aluminio, mg/l	0,1191	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,0192	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,1	no fija límite
Hierro, mg/l	1,4662	1
Indice de Langelier	2,08	no fija límite
Magnesio, mg/l	70,2	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,07455	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,00311	0.05
Potasio, mg/l	4,6524	no fija límite
RAS	2,3399	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	257,66	400
Zinc, mg/l	0,0446	5
pH	8,97	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	1,72	> 3
Conductividad, ohm/cm	3310	1700
ORP	-102	
Temperatura, oC	28,24	no fija límite

<b>PUNTO MARNR-2</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	58,96	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	628,96	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	767,33	no fija límite
Calcio, mg/l	348	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	976	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	210	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	1100	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	0,9	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	6,96	60
DQO, mg/l	40	350
Dureza Calcica, mg/l	870	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	400	no fija límite
Dureza Total, mg/l	1270	500
Nitratos, mg/l	2,22	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,13	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	644,16	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	3084	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	3752	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	57,9074	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	54,0956	no fija límite
Turbidez, UNT	5	5
Aluminio, mg/l	0,0688	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,0094	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,2	no fija límite
Hierro, mg/l	0,2557	1
Indice de Langelier	1,43	no fija límite
Magnesio, mg/l	104	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,38966	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,056	0.05
Potasio, mg/l	5,6133	no fija límite
RAS	7,7451	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	854,85	400
Zinc, mg/l	0,0515	5
pH	7,47	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	0,46	> 3
Conductividad, ohm/cm	4740	1700
ORP	-13	
Temperatura, oC	29,03	no fija limite

<b>PUNTO MARNR-5</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	1	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	0	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	353,77	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	341,6	no fija límite
Calcio, mg/l	96	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	29,4	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	1100	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	3100	< 10000
Color Real, Pt-Co	2,1	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	7,7	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	5,86	60
DQO, mg/l	42	350
Dureza Calcica, mg/l	240	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	76,15	no fija límite
Dureza Total, mg/l	316,15	500
Nitratos, mg/l	1,66	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,1	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	19,4	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	300	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	496	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	6,821	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	7,3706	no fija límite
Turbidez, UNT	22	5
Aluminio, mg/l	0,0415	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,01076	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	< 0.10	no fija límite
Hierro, mg/l	1,659	1
Indice de Langelier	1,53	no fija límite
Magnesio, mg/l	19,8	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,4262	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,0282	0.05
Potasio, mg/l	1,81	no fija límite
RAS	0,4691	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	18,87	400
Zinc, mg/l	0,1317	5
pH	8,29	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	0,98	> 3
Conductividad, ohm/cm	507	1700
ORP	-32	
Temperatura, oC	32,5	no fija límite

<b>PUNTO POBO-1</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	19,65	no fija límite
Alcalinilidad Total, mg/l	860,65	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	1050	no fija límite
Calcio, mg/l	212	no fija límite
Carbonatos, mg/l	23,6	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	264,58	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	1100	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	2400	< 10000
Color Real, Pt-Co	0,6	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	2,8	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	3,76	60
DQO, mg/l	38,5	350
Dureza Calcica, mg/l	530	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	380	no fija límite
Dureza Total, mg/l	910	500
Nitratos, mg/l	3,33	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,12	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	174,62	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	1928	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	2016	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	27,6509	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	26,4005	no fija límite
Turbidez, UNT	10	5
Aluminio, mg/l	0,0203	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,004522	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	< 0.10	no fija límite
Hierro, mg/l	0,5598	1
Indice de Langelier	2,19	no fija límite
Magnesio, mg/l	98,8	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,012	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	< 0.10	0.05
Potasio, mg/l	2,9888	no fija límite
RAS	2,4696	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	105,24	400
Zinc, mg/l	0,0256	5
pH	8,35	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	1	> 3
Conductividad, ohm/cm	2767	1700
ORP	-106	
Temperatura, oC	27,61	no fija límite

<b>PUNTO PM-051</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	1,67	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	0	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	353,77	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	341,6	no fija límite
Calcio, mg/l	212,4	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	-	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	0	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	750	< 10000
Color Real, Pt-Co	0,8	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	14,1	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	3,66	60
DQO, mg/l	48	350
Dureza Calcica, mg/l	536	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	761,84	no fija límite
Dureza Total, mg/l	1297,84	500
Nitratos, mg/l	0,9	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,3	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	351,18	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	2868	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	2740	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	45,6083	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	42,782	no fija límite
Turbidez, UNT	158	5
Aluminio, mg/l	0,1594	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,088	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,3	no fija límite
Hierro, mg/l	8,6733	1
Indice de Langelier	1,56	no fija límite
Magnesio, mg/l	198,08	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,5455	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,03377	0.05
Potasio, mg/l	7,84	no fija límite
RAS	4,1293	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	1200,72	400
Zinc, mg/l	36,9	5
pH	8,06	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	1,99	> 3
Conductividad, ohm/cm	4524	1700
ORP	-3	
Temperatura, oC	30,15	no fija límite



**PUNTO PRX-010**

<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	0	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	709	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	865	no fija límite
Calcio, mg/l	412	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	743,76	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	0	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	150	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	0,96	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	4,44	60
DQO, mg/l	56	350
Dureza Calcica, mg/l	1030	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	451	no fija límite
Dureza Total, mg/l	1481	500
Nitratos, mg/l	0,66	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,08	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	490,88	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	3012	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	3392	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	55,9367	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	56,9056	no fija límite
Turbidez, UNT	2	5
Aluminio, mg/l	0,5283	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,0187	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	< 0.10	no fija límite
Hierro, mg/l	1,8366	1
Indice de Langelier	1,68	no fija límite
Magnesio, mg/l	180,4	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,3422	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,0461	0.05
Potasio, mg/l	4,6555	no fija límite
RAS	5,0495	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	997,98	400
Zinc, mg/l	0,2042	5
pH	7,6	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	0,39	> 3
Conductividad, ohm/cm	5042	1700
ORP	113	
Temperatura, oC	29,45	no fija límite

<b>PUNTO FEX010</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	58,96	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	922,95	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	1126	no fija límite
Calcio, mg/l	280	no fija límite
Carbonatos, mg/l	70,75	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	173,45	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	0	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	710	< 10000
Color Real, Pt-Co	0,4	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	1,3	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	10,26	60
DQO, mg/l	68	350
Dureza Calcica, mg/l	260	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	280	no fija límite
Dureza Total, mg/l	540	500
Nitratos, mg/l	1,77	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,16	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	114,65	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	1008	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	1127	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	26,8721	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	25,0377	no fija límite
Turbidez, UNT	9	5
Aluminio, mg/l	0,6893	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,007322	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,1	no fija límite
Hierro, mg/l	0,9683	1
Indice de Langelier	1,95	no fija límite
Magnesio, mg/l	72,8	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,0497	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	< 0.10	0.05
Potasio, mg/l	2,3877	no fija límite
RAS	1,5689	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	56,5	400
Zinc, mg/l	0,07546	5
pH	8,4	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	1,02	> 3
Conductividad, ohm/cm	1407	1700
ORP	-35	
Temperatura, oC	28,94	no fija límite

<b>PUNTO FEX-021</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	< 0.10	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	19,65	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	511	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	575,47	no fija límite
Calcio, mg/l	592	no fija límite
Carbonatos, mg/l	23,58	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	114,65	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	410	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	1100	< 10000
Color Real, Pt-Co	< 0.50	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	2,6	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	3,33	60
DQO, mg/l	33,9	350
Dureza Calcica, mg/l	1480	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	730	no fija límite
Dureza Total, mg/l	2210	500
Nitratos, mg/l	2,1	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,21	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	68,78	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	2388	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	2496	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	45,9413	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	48,5892	no fija límite
Turbidez, UNT	6	5
Aluminio, mg/l	0,0739	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,001	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,2	no fija límite
Hierro, mg/l	1,4688	1
Indice de Langelier	2,39	no fija límite
Magnesio, mg/l	189,8	no fija límite
Manganeso, mg/l	0,08777	0.10
Mercurio, mg/l	< 0.001	0.01
Plomo, mg/l	0,0055	0.05
Potasio, mg/l	3,57	no fija límite
RAS	0,6892	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	1560,48	400
Zinc, mg/l	0,03977	5
pH	8,45	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	1,1	> 3
Conductividad, ohm/cm	3473	1700
ORP	-77	
Temperatura, oC	30,02	no fija límite

<b>PUNTO MARNR-6</b>		
<b>Parametros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Máximo permisible</b>
Aceites Minerales, mg/l	7,33	0.30
Alcalinidad Fenoltaleinica, mg/l	0	no fija límite
Alcalinidad Total, mg/l	110,65	no fija límite
Bicarbonatos, mg/l	135	no fija límite
Calcio, mg/l	16	no fija límite
Carbonatos, mg/l	0	no fija límite
Caudal, m3/h	-	no fija límite
Cloruros, mg/l	59,09	600
Coliformes Fecales, NMP/100ml	410	> 100
Coliformes Totales, NMP/100ml	1100	< 10000
Color Real, Pt-Co	22,6	500 unid.
Color Aparente, Pt-Co	59,1	no fija límite
DBO 5 a 20 oC, mg/l	12,84	60
DQO, mg/l	93,83	350
Dureza Calcica, mg/l	40	no fija límite
Dureza Magnesica, mg/l	60	no fija límite
Dureza Total, mg/l	100	500
Nitratos, mg/l	0,44	Nitri+Nitra < 10
Nitritos, mg/l	0,01	Nitri+Nitra < 10
Sodio, mg/l	35,44	200
Solidos Totales Disueltos, mg/l	291	1500
Solidos Totales, (105oC)mg/l	366	no fija límite
Suma de Aniones, meq/l	4,2191	no fija límite
Suma de Cationes, meq/l	3,911	no fija límite
Turbidez, UNT	187	5
Aluminio, mg/l	0,0327	0.20
Arsenico, mg/l	< 0.10	no fija límite
Bario, mg/l	< 0.10	no fija límite
Cromo Total, mg/l	0,0133	0.05
Fluoruros, mg/l	< 0.10	< 1.70
Fosforo Total, mg/l	0,63	no fija límite
Hierro, mg/l	0,87	1
Indice de Langelier	-1,26	no fija límite
Magnesio, mg/l	15,6	no fija límite
Manganeso, mg/l	2,5371	0.10
Mercurio, mg/l	0,03157	0.01
Plomo, mg/l	< 0.10	0.05
Potasio, mg/l	3,91	no fija límite
RAS	1,6511	< 10 meq/lt
Sulfatos, mg/l	16,31	400
Zinc, mg/l	0,01643	5
pH	6,84	6-8.5
Oxigeno Disuelto, mg/l	3,58	> 3
Conductividad, ohm/cm	450	1700
ORP	368	
Temperatura, oC	28,99	no fija límite

NMP: número más probable; DBO: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno; UNT: unidades nefelométricas de turbidez; RAS: rata de absorción de sodio; ORP: potencial de oxido-reducción.

## ANEXO E

### CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE MARN DIRECCIÓN ESTATAL AMBIENTAL ZULIA DIVISIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEPARTAMENTO DE HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA

VELOCIDAD MAXIMA DEL VIENTO A 10m (km/h)						
ESTACION CARICHUANO			AÑO 2004			
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	-	27	27	32,8	18	22,3
2	-	22	24	28,1	9	9,4
3	-	26	21	18,7	22	16,9
4	-	19	28	21,9	16,2	29,9
5	-	27	29	18	14,4	14,4
6	-	25	26	33,5	17,6	12,2
7	-	27	23	22,3	19	20,5
8	1	19	28	17,3	21,6	22,3
9	7	26	25	18,4	25,6	24,5
10	22	23	24	16,2	22,3	25,9
11	26	31	21	23,8	22,7	19,1
12	10	18	27	23,4	21,6	18
13	21	22	27	27,7	17,6	18
14	18	34	25	22	10,8	16,2
15	20	24	20	10,8	16,2	15,8
16	31	26	10	24,8	18,3	25,9
17	20	24	23	34,2	18	46,8
18	27	25	50	19,8	18	45,4
19	31	23	22	16,2	10,8	15,5
20	29	33	21	23,4	14,4	15,8
21	29	26	28	28,8	32	13,7
22	21	23	18	15,5	11,9	15,8
23	20	22	26	10,4	14,4	14,4
24	26	24	21	28,8	22,3	16,9
25	25	23	19	10,4	19,4	15,8
26	25	24	28	24,5	21,6	59,8
27	31	30	18	18	18	22,7
28	25	27	20	11,2	27,4	15,1
29	27	26	25	7,2	15,1	14,4
30	26		23	28,8	20,2	22,7
31	19		21		28,8	
<b>MEDIA</b>	<b>22,4</b>	<b>25,0</b>	<b>24,1</b>	<b>21,2</b>	<b>18,9</b>	<b>21,5</b>

<b>DIRECCION DEL VIENTO A 10m</b>						
<b>ESTACION CARICHUANO</b>			<b>AÑO 2004</b>			
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
1	-	N	N	NE	NNE	N
2	-	ENE	N	NNW	NNE	NNW
3	-	ENE	N	NE	NNW	NNW
4	-	N	ENE	NE	NNW	SE
5	-	NNE	N	NE	NNE	S
6	-	ENE	NNW	NNW	N	N
7	-	ENE	NE	NNW	N	SE
8	NNW	N	ENE	NNW	NNW	N
9	NNW	E	ENE	NNW	ENE	NNW
10	NNW	N	NNW	NNE	NNW	N
11	NNW	ENE	ENE	NNW	ENE	ENE
12	NNW	N	NNW	NNW	NNW	N
13	NNW	NNW	NE	SE	NNW	ENE
14	NNW	N	NNW	NNW	ENE	S
15	S	ENE	NNW	ENE	NE	N
16	NE	ENE	NNW	WNW	NE	NE
17	NNW	ESE	NE	WNW	ENE	ENE
18	-	-	-	-	-	-
19	NNW	NE	NNW	NNW	N	WSW
20	ENE	NE	ENE	NNW	NNW	NE
21	N	NE	NNW	NNW	WSW	NNE
22	ENE	ENE	ENE	NNW	NE	NW
23	NNW	ENE	ENE	NNW	ESE	SW
24	NNW	N	ENE	NNW	NE	WSW
25	ENE	NNW	NNW	NNE	NE	NW
26	NE	NNW	NNW	S	NNW	ESE
27	NE	NNE	NNW	NNW	NE	ENE
28	NE	NNW	NNW	NE	NNW	NW
29	ENE	NNE	N	NE	ENE	N
30	NNW		NNW	ENE	ENE	ENE
31	NNW		N		SSE	
<b>PREV.</b>	<b>NNW</b>	<b>ENE</b>	<b>NNW</b>	<b>NNW</b>	<b>NNW</b>	<b>N</b>

<b>RADIACION DIRECTA Y DIFUSA (Cal/cm2)</b>							
<b>ESTACION CARICHUANO</b>				<b>AÑO 2004</b>			
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>
1	288	441	464	480	449	309	256
2	294	416	340	512	418	272	399
3	342	453	470	343	387	229	412
4	354	318	470	318	281	365	412
5	354	386	457	418	281	396	393
6	294	392	315	356	337	321	456
7	366	324	414	362	193	365	275
8	336	171	464	169	218	457	349
9	330	233	444	437	237	352	456
10	366	269	464	393	306	216	456
11	354	349	457	418	168	315	300
12	270	477	241	374	175	383	487
13	294	300	303	144	237	346	374
14	402	483	365	387	250	111	368
15	408	471	358	225	331	396	349
16	420	471	93	337	312	420	306
17	372	343	389	399	424	365	393
18	384	379	334	281	356	111	431
19	366	435	476	368	187	315	387
20	396	496	531	349	337	365	393
21	444	386	544	293	331	266	374
22	426	373	550	318	331	291	318
23	390	441	513	281	306	352	381
24	342	416	488	165	275	371	462
25	378	453	476	287	399	365	268
26	366	398	482	331	349	445	337
27	450	465	402	312	337	488	387
28	444	453	500	356	406	451	387
29	444	384	457	343	362	501	381
30	408		464	462	362	433	318
31	414		389		331		243
<b>TOTAL</b>	<b>11496</b>	<b>11376</b>	<b>13114</b>	<b>10218</b>	<b>9673</b>	<b>10372</b>	<b>11508</b>
<b>MEDIA</b>	<b>371</b>	<b>392</b>	<b>423</b>	<b>341</b>	<b>312</b>	<b>346</b>	<b>371</b>

<b>TEMPERATURA DEL AIRE (oC) - Minima observada</b>						
<b>ESTACION EL CARBON                      AÑO 2004</b>						
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
1	24,8	22,5	25,5	28	25,8	28
2	23,9	25	23,7	27,6	27,5	28
3	24,3	26,6	23,1	28,4	27,8	27,5
4	24,1	27,7	24,1	29	28,5	26,4
5	25,3	27	27	28,3	28,7	25,8
6	24,9	26,9	27	29	26,5	28
7	26,3	27,7	25,5	28,8	28	27,1
8	26	27	25,7	26	27	28,1
9	26,4	26,4	23,1	25,5	27,5	27,9
10	25,5	26,8	25,5	27,9	28	28
11	24,1	25,9	27	28	27,8	28
12	25,1	25,9	26,4	29	27,6	28,7
13	24	25,2	27	27,7	27,5	27,8
14	23,8	23,3	27,9	26,9	27,4	27,8
15	23,5	23,5	26,5	27	26,2	27,4
16	22,9	25,2	25,5	26,8	26,6	26
17	24,7	25,5	27	26	26,5	28
18	24	24,7	27	26	28,4	24
19	23	25,1	26	26,5	27,3	25,5
20	22	25	27	27,2	26,8	26,1
21	22	25,1	26,8	27,5	26,5	27,3
22	24,6	25,5	25,6	26,6	26	25,9
23	23,8	25	26,5	27,1	27,4	25,9
24	23,1	24	27	27,2	28,1	25,8
25	24,7	22,9	26	27,8	28	27
26	29,5	24,2	28,5	27	28	24,4
27	23,5	24	28,6	27	27,6	24,8
28	24,9	24,8	27	27	28,8	27
29	25,1		29	28,1	28	27,5
30	23,1		26	28	28,1	27,6
31	22,6		24		28,1	
<b>MEDIA</b>	<b>24,4</b>	<b>25,3</b>	<b>26,2</b>	<b>27,4</b>	<b>27,5</b>	<b>26,9</b>



<b>HUMEDAD RELATIVA MINIMA (%)</b>						
<b>ESTACION EL CARBON</b>			<b>AÑO 2004</b>			
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
1	50	37	51	35	48	55
2	49	30	42	46	47	63
3	50	46	43	47	52	57
4	49	44	45	45	57	51
5	49	47	50	50	66	35
6	54	48	46	52	54	52
7	51	60	45	48	60	48
8	50	58	45	60	51	50
9	56	52	42	42	58	48
10	50	51	42	44	55	52
11	47	40	56	48	55	52
12	55	48	51	45	58	51
13	42	40	51	60	56	52
14	39	32	51	47	52	68
15	39	31	83	66	52	43
16	37	42	44	40	55	43
17	42	44	34	36	51	54
18	43	38	25	48	55	88
19	38	40	30	51	49	57
20	33	39	36	55	54	61
21	35	42	34	58	42	69
22	36	40	31	61	61	60
23	37	47	35	66	54	60
24	34	48	33	78	51	46
25	40	44	38	52	51	56
26	35	38	44	53	55	54
27	35	36	32	58	49	54
28	30	43	40	54	44	54
29	43		43	52	50	60
30	37		30	52	40	55
31	33		34		48	
<b>MEDIA</b>	<b>42,5</b>	<b>43,0</b>	<b>42,1</b>	<b>51,6</b>	<b>52,6</b>	<b>54,9</b>

<b>HUMEDAD RELATIVA MAXIMA (%)</b>						
<b>ESTACION EL CARBON</b>			<b>AÑO 2004</b>			
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
1	100	98	88	93	100	95
2	100	100	100	85	100	91
3	100	93	100	90	100	96
4	100	92	99	92	100	100
5	100	100	100	95	90	100
6	100	100	100	92	100	99
7	100	94	97	93	93	100
8	100	93	91	99	100	99
9	100	96	100	100	92	92
10	100	96	98	86	98	97
11	100	100	90	92	96	97
12	98	89	95	93	95	96
13	100	100	92	100	99	100
14	100	100	93	99	99	100
15	99	100	100	100	100	100
16	100	97	100	100	97	100
17	98	100	100	100	100	95
18	99	100	100	100	95	100
19	99	100	100	100	97	100
20	99	99	100	100	96	95
21	98	100	100	100	100	91
22	100	100	100	100	98	96
23	100	90	100	100	93	98
24	100	97	100	100	90	95
25	99	100	100	100	89	90
26	100	99	100	100	86	98
27	100	91	100	100	95	99
28	100	100	100	100	90	89
29	100		100	100	93	92
30	100		91	100	93	93
31	100		100		90	
<b>MEDIA</b>	<b>100</b>	<b>97</b>	<b>98</b>	<b>97</b>	<b>96</b>	<b>96</b>

<b>TEMPERATURA DEL AIRE (oC) - Maxima observada</b>						
<b>ESTACION EL CARBON</b>			<b>AÑO 2004</b>			
<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
1	31,6	31,3	30,9	33,6	34	32,6
2	31,1	32	32,7	33,2	34,9	32
3	30,9	32	31,9	35,2	34,6	31,3
4	31,7	33,5	35,3	34,6	33,5	31
5	32,1	33	33,8	38,1	31,1	33
6	31,5	32,3	33,8	34,6	31,9	33
7	32,9	30,5	33,9	34,2	31,2	32,1
8	32	30,8	32,9	31	32	32,3
9	32	31	33,3	32,9	31,3	32,1
10	31,1	31	33,9	33,7	32,6	32,6
11	30,7	31,9	31,6	34	32	32,2
12	29,5	31,3	32,2	34	31	33,1
13	30,4	31	33	31,1	31,7	31
14	32	31,9	33,9	33,1	32,4	29,8
15	30,9	31,7	29,9	31	32	33,2
16	31,5	32	35,3	34,6	32	33,2
17	31,7	31,7	36,6	35	33,1	32,6
18	30,7	31,9	37,2	33	32,4	29
19	29	31,5	37,4	33,1	31,5	29,5
20	29,6	32,6	34,8	32,6	35,2	30,9
21	32	32,9	34,2	30,9	36,9	30,1
22	32,2	34,1	34,4	30,6	33	30,1
23	31,6	31,2	35,3	30,9	32,8	30,9
24	30,9	31,4	37	30	33,5	33
25	32,1	31,7	37,2	33,6	33	34
26	30,9	32	35,9	33,8	32,6	33,6
27	30,5	31,6	36,4	32,2	33,6	32
28	32,9	31,2	35,2	33	35,2	32
29	31,7		34,6	33,9	34	31,1
30	31,9		34,4	34	35,3	31,6
31	31,2		34,2		33,9	
<b>MEDIA</b>	<b>31,3</b>	<b>31,8</b>	<b>34,3</b>	<b>33,2</b>	<b>33,0</b>	<b>31,8</b>



## ANEXO F

### PRECIPITACIÓN MENSUAL HORAS COMPRENDIDAS DE 08:00am – 07:59am (Datos expresados en mm) AÑO 2004

ESTACION DISPATCH													
Día	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1	12,6	0	0,2	0	0	0	0	0	57,8	5,6	0,3	6,5	
2	2,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40,9	0	
3	0	1,7	0	0	0	0,3	0	0	0	0	80,5	3,6	
4	0	0	0	2	1,7	0	0	0	0	0	2,6	25,3	
5	0	0	0	19,7	0	0	12,3	0	9	12,8	18,8	3,3	
6	0	0	0	0	0,5	0	2,6	3,3	0	8,7	72,6	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	0,2	3,1	13,4	67,7	10,9	
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47,3	34,6	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0,2	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0,3	1,7	0	0,1	0	
12	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	6,6	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	5,8	0	0	
15	0,1	0	0	1,1	0	0	0	0	0,7	0	5,4	0	
16	0	0	0	3,2	0	0	4,6	0	2,3	0	3,1	7,8	
17	0	0	0	0	5,7	0	0	0	0	0	37,3	4	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40,3	9,2	0	
19	0	0	0	0	56,7	0	0	0	0	25,9	112,6	0	
20	0	0	0	6,8	22,5	0	0	0	3,7	0	21	0	
21	0	0	0	0,1	17,3	0	3	21,7	6,7	2,3	0,7	0,6	
22	0	0	0	7,4	2,2	0	38,9	0	0	38,7	0	0	
23	0	0	0	0,5	0	0	3,1	0	0	0,4	0,7	0	
24	0	0	0	11,5	156,3	0,5	0	0	0	3,1	19,7	0	
25	0	0	0	62,5	3	0	0	0	0	0	3,6	0	
26	0	0	0	0	4,2	0	0	0	0	2,3	0,8	4,2	
27	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	6	0	
28	0	0	0	13,1	0	0	0	0	1,6	0	0	0	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	14,2	37,2	0	
30	0		0	0	2,8	0	0	0		20,6	9,5	0	
31	0		0		0,5		0	27,1		62,7		0	
<b>Total</b>	<b>15,4</b>	<b>1,7</b>	<b>0,2</b>	<b>127,9</b>	<b>298,7</b>	<b>0,8</b>	<b>64,5</b>	<b>52,6</b>	<b>87,1</b>	<b>304,1</b>	<b>585,1</b>	<b>66,2</b>	<b>1604,3</b>

**ESTACION CARICHUANO**

<b>Dia</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>
1	0,8	0	2,2	0	0	0,1	0	0	32,3	4,5	0	7,3	
2	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	21,7	0,7	
3	0	0,2	0	0	0	2,4	0	0	0	0	17,7	1,4	
4	0	0,4	0	5,2	3,5	0	0	0	0	0	5,9	14,9	
5	0	0	0	22,1	0	0	28	0	3,3	31,3	1,5	1,4	
6	0	0	0	0	0,3	0	2	1,6	0,2	0,2	20,9	0	
7	0	0	0	0	0	0,2	0	0	2,7	15,8	21,7	8,5	
8	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0,7	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	10,5	1,8	37,6	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	3,1	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0,8	1,3	0	0,2	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0,2	0	0	1,4	1	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0,8	0	0	0	0	13,1	0	0	
15	0	0	0	4,2	0	0	0	0	4,2	0,1	0,1	0	
16	0	0	0	13,5	0	0	1,4	0	0,2	0	2,6	7	
17	0	0	0	0	4,5	0	5,2	0	0	0	32,3	4,3	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,8	81,3	0	
19	0	0	0	0	16,6	0	0	0	0	3	123	0	
20	0	0	0	8,8	25,6	0	0	0	3,4	0	9,7	0	
21	0	0	0	1,2	12,8	0	2,4	0	25,5	0	0	0,5	
22	0	0	0	5,2	2,8	0	4,6	14,9	0,8	9,8	1,5	0,2	
23	0	0	0	12,2	0	0	24,9	0	0	24,4	0,6	0	
24	0	0	0	4,9	138	1	0	0	0,5	0,2	3,3	0	
25	0	0	0	52,9	2,4	0	0	0,2	0	0	0,5	0	
26	0	0	0	0	2,8	0	0	0	0,2	4,5	0,9	3	
27	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	2,6	0	
28	0	0	0	2,3	0	0	0	0	0,4	0	0	0	
29	0	0	0	1,6	0	0	0	0	1	16,7	50,7	0	
30	0		0		3,7	0	0	0,8	0,4	10,7	6,5	0	
31	0		0		0,7		1,5	19,9		33,4		0	
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>0,6</b>	<b>2,2</b>	<b>135,5</b>	<b>232</b>	<b>3,7</b>	<b>70</b>	<b>38,2</b>	<b>90,7</b>	<b>203</b>	<b>443</b>	<b>49,2</b>	<b>1272,3</b>

**ESTACION EL CARBON**

<b>Dia</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>
1	7,7	0	0	0	1,1	0	0	0	30,1	0	1,2	3	
2	0,4	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	68,3	0	
3	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	60,8	6	
4	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	1,1	9	
5	0	0	0	0,4	1,2	0	0,7	0	2,9	35,7	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,2	9,8	25,8	0	
7	0	0	0,3	0	0	6,5	0	0	0	3	66,2	0	
8	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	2,2	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	9	36,3	10,5	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	5	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	3	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	1,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0	
14	0,3	0	0	1,2	1,2	0	0	0	0	9	0	0	
15	0	0	0	5,2	0	0	0	0	6	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	3,2	0	5	0	6,6	0	
17	0	0	0	0	2,5	0	2,2	0	0	0	29,5	0	
18	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	15,3	66,4	0	
19	0	0	0	0,2	9,9	0	0	0	2,2	7,8	3,9	0	
20	0	0	0	1,7	9,4	0	0	0	0	0	45,2	0	
21	0	0	0	1,1	9,8	0	2,4	0	1,2	27,2	4,5	0	
22	0	0	0	3,2	2,4	0	0	8,8	0	66,9	0	5	
23	0	0	0	0,2	0	0	3,8	0	0	3	0	0	
24	0	0	0	2,2	96	6	0	0	0	10,8	4,9	0	
25	0	0	0	4,3	1,5	0	0	0	0	0	5	2	
26	0	0	0	0	3,7	0	0	0	0	6,8	7	0	
27	0	0	0	3,5	7,5	0	0	0	0	0	2	0	
28	0	0	0	0	0,3	0	0	0	2	0	0	0	
29	0	0,7	0	0	0	0	0	0	20,9	2	40	0	
30	0		0	0	1,3	0	0	0	2	47,4	9	0	
31	0		0		7,5		0	0		128		0	
<b>Total</b>	<b>8,4</b>	<b>1,9</b>	<b>0,3</b>	<b>24,5</b>	<b>156</b>	<b>12,5</b>	<b>12,8</b>	<b>9,3</b>	<b>88,7</b>	<b>417,2</b>	<b>466,9</b>	<b>26</b>	<b>1224,5</b>

## ANEXO J

### DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MUESTRAS DE FOSA BAQUETA POR MEDIO DE LA TRITURACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 40 Trituración Primaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
3/4"	19,500	5	0,424	0,424	99,576
3	6,727	605	51,358	51,783	48,217
10	2,000	355	30,136	81,919	18,081
30	0,600	142	12,054	93,973	6,027
70	0,212	15	1,273	95,246	4,754
200	0,074	40	3,396	98,642	1,358
400	0,038	13	1,104	99,745	0,255
-400	0,038	3	0,255	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 40 Trituración Secundaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
6	3,3335	172	15,454	15,454	84,546
10	2,0000	341	30,638	46,092	53,908
30	0,6000	418	37,556	83,648	16,352
70	0,2120	45	4,043	87,691	12,309
200	0,0740	105	9,434	97,125	2,875
400	0,0381	28	2,516	99,641	0,359
-400	0,0381	4	0,359	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 50 Trituración Primaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
3/4"	19,500	167	16,997	16,997	83,003
3	6,727	400	40,712	57,710	42,290
10	2,000	200	20,356	78,066	21,934
30	0,600	152	15,471	93,537	6,463
70	0,212	8,5	0,865	94,402	5,598
200	0,074	45	4,580	98,982	1,018
400	0,038	9	0,916	99,898	0,102
-400	0,038	1	0,102	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia



**Distribución granulométrica de la muestra del manto 50 Trituración Secundaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
6	3,3335	216	21,600	21,600	78,400
10	2,000	186	18,600	40,200	59,800
30	0,600	391	39,100	79,300	20,700
70	0,212	48	4,800	84,100	15,900
200	0,074	135	13,500	97,600	2,400
400	0,038	20	2,000	99,600	0,400
-400	0,038	4	0,400	100,000	0,000

Fuente: Elaboración propia.

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 6M Trituración Primaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
3	6,727	292,5	29,294	29,294	70,706
10	2,000	370,5	37,106	66,400	33,600
30	0,600	242	24,236	90,636	9,364
70	0,212	73	7,311	97,947	2,053
200	0,074	19,5	1,953	99,900	0,100
400	0,038	1	0,100	100,000	0,000
-400	0,038	0	0,000	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 6M Trituración Secundaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
6	3,3335	97	9,954	9,954	90,046
10	2,000	224	22,986	32,940	67,060
30	0,600	416,5	42,740	75,680	24,320
70	0,212	157	16,111	91,791	8,209
200	0,074	77	7,901	99,692	0,308
400	0,038	3	0,308	100,000	0,000
-400	0,038	0	0,000	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 7M Trituración Primaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
3/4"	19,500	28,5	2,869	2,869	97,131
3	6,727	650	65,425	68,294	31,706
10	2,000	150	15,098	83,392	16,608
30	0,600	46,5	4,680	88,072	11,928
70	0,212	5,5	0,554	88,626	11,374
200	0,074	84	8,455	97,081	2,919
400	0,038	25	2,516	99,597	0,403
-400	0,038	4	0,403	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

**Distribución granulométrica de la muestra del manto 7M Trituración Secundaria**

MALLA	ABERTURA (mm)	RETENIDO (gr)	RETENIDO %	RETENIDO ACUMULADO %	PASANTE ACUMULADO %
6	3,3335	159	16,834	16,834	83,166
10	2,000	263	27,845	44,680	55,320
30	0,600	336	35,574	80,254	19,746
70	0,212	40	4,235	84,489	15,511
200	0,074	98	10,376	94,865	5,135
400	0,038	45	4,764	99,629	0,371
-400	0,038	3,5	0,371	100,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO K

### OBSERVACIONES DE LOS BOQUES A SER MINADOS EN LA FOSA BAQUETA

**OCTUBRE 2004**

<b>PANEL</b>	<b>MANTO</b>	<b>NIVEL</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
N1	8I	12	Cambio de rumbo de NE a N. Afectado Falla Este contacto Oeste con 7M
	8KM	12	Cambio de rumbo de NE a N. Afectado Falla Este contacto Oeste con 7M
	7M	12	Afectado por Corredor de Falla (CF) Este Contacto con 8I y 8 KM.
	7O	12	Afectado por Corredor Falla E contacto con 7M.
	6M	12	Afectado por Falla menor paralelo a CF Este (2 m).
	6O	12	Afectado por Falla menor paralelo a CF Este (2 m).
	6Q	12	Homogéneo.
	5O	0	Homogéneo
N2	8I	12	Homogéneo.
	8KM	12	Homogeneo.
	7M	12	Afectado por CF Este contacto con 7O (Oeste).
	7O	12	Afectado por CF Este contacto con 6M (Oeste).
	6M	12	Afectado por CF Este contacto con 7M (Este).
	6O	12	Afectado por CF Este contacto con 7O (Este).
	6Q	12	Afectado por CF Este contacto con 7O y 6K (Este).
	4M	0	Homogéneo.
N3	8I	12	Homogéneo.
	8KM	12	Homogéneo.
	7M	12	Homogéneo.
	7O	12	Homogéneo.
	5O	12	Homogéneo.
	4M	0	Homogéneo.
N4	5O	12	Homogéneo. Ligero cambio de rumbo hacia el NE.
C7	4M	-12	Afectado por falla pequeña/pliegue de rumbo NW-SE.
C8	4M	-12	Afectado por falla pequeña/pliegue de rumbo NW-SE.

**NOVIEMBRE 2004**

<b>PANEL</b>	<b>MANTO</b>	<b>NIVEL</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
N1	4M	-12	Afectado por falla pequeña/pliegue de rumbo NW-SE.
N2	5O	0	Homogéneo.
	4M	-12	Homogéneo ligero rumbo al NE.
N3	5M	12	Afectado por CF Este contacto con 6O y 6K (Este).
	5O	0	Homogéneo.
	4M	-12	Homogéneo.
N4	7O	12	Homogéneo.
	6M	12	Ligeramente plegado por cercanía al CF Este.
	6O	12	Afectado por CF Este contacto con 5M, 5N <sub>5</sub> (Oeste).
	5M	12	Afectado por CF Este contacto con 6O (Este).
C6	8I	0	Afectado por CF Este (plegado).
	7M	0	Afectado por CF Este contacto con 8KM (oeste).
	7O	0	Homogéneo.
	6M	0	Afectado por falla menor (1 m) de rumbo NW-SE.
	6O	0	Afectado por falla menor (1 m) de rumbo NW.
	6Q	0	Afectado por falla menor (1 m) de rumbo NW
	5M	0	Afectado por falla menor (1 m) de rumbo NW
	5M <sub>1</sub>	0	Homogéneo. Separación de 5M <sub>2</sub> de 40 cm aprox.
	5M <sub>2</sub>	0	Homogéneo. Separación de 5M <sub>1</sub> de 40 cm aprox.
C7	8I	0	Localizado en pleno CF, plegado y fallado.
	8KM	0	Localizado en pleno CF, plegado y fallado.
	7M	0	Localizado en pleno CF, plegado y fallado.
	7O	0	Localizado en pleno CF, plegado y fallado.
	6M	0	Homogéneo, ligero cambio de rumbo hacia el NE.
	6O	0	Homogéneo, ligero cambio de rumbo hacia el NE.
	6Q	0	Homogéneo, ligero cambio de rumbo hacia el NE.
	5M	0	Homogéneo.
	5M <sub>1</sub>	0	Homogéneo. Separación de 5M <sub>2</sub> de 40 cm aprox.
	5M <sub>2</sub>	0	Homogéneo. Separación de 5M <sub>1</sub> de 40 cm aprox.

**DICIEMBRE 2004**

<b>PANEL</b>	<b>MANTO</b>	<b>NIVEL</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
N1	8I	0	Homogéneo.
	8KM	0	Homogéneo.
	7M	0	Extremo SW afectado por CF Este (pliegues).
	7O	0	Extremo SW afectado por CF Este (pliegues).
	6M	0	Afectado por CF Este, incremento a 24° el buzamiento de los estratos.
	6O	0	Afectado por CF Este, incremento a 24° el buzamiento de los estratos.
	6Q	0	Afectado por CF Este, incremento a 24° el buzamiento de los estratos.
	5M	0	Homogéneo.
	5O	-12	Homogéneo.
N2	9O	0	Homogéneo.
	8I	0	Homogéneo.
	8K	0	Homogéneo.
	8KM	0	Homogéneo.
	7M	0	Homogéneo.
	7O	0	Afectado por CF Este contacto con 6M, 6O (SW).
	6M	0	Afectado por CF Este contacto con 7O (E).
	6O	0	Afectado por CF Este contacto con 7M (E).
	6Q	0	Afectado por CF Este.
	5M	0	Afectado por CF Este contacto con 6M, 6O (E).
N3	4M	-12	Homogéneo.
N4	5O	0	Homogéneo.
C6	9O	-12	Afectado por CF Este contacto con 7M (Oeste).
	7M	-12	Afectado por CF Este contacto con 9O, 9Q (Este).
	7O	-12	Homogéneo.
	6M	-12	Homogéneo.
	6MO	-12	Homogéneo.
	6O	-12	Afectado por falla menor (1m) de rumbo Oeste-Este.
	6Q	-12	Afectado por falla menor (1m) de rumbo Oeste.
	5M	-12	Afectado por falla menor (1m) de rumbo Oeste.
	5M <sub>2</sub>	-12	Afectado por falla menor (1m) de rumbo Oeste.
	5O	-12	Homogéneo.
	4M	-24	Homogéneo.
C7	9O	0	Homogéneo.
	6Q	-12	Homogéneo.
	5M	-12	Homogéneo.
	5O	-12	Homogéneo.
	4M	-24	Afectado ligeramente por falla (1m) de rumbo NW-SE.

