

REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS



**CARACTERIZACION DE CARBONES COLOMBIANOS
ZONA CHECUA - LENGUAZAQUE**

Informe 1933

Por:

FABIO H. PEREZ G., GLADYS VALDERRAMA C., GUILLERMO BLANCO C.,
LUZ MYRIAM GONZALEZ C. y FABIO GARCIA G.

Volumen 28, No. 2 - pp. 1 - 218, 1987
Bogotá - Colombia
ISSN - 0120 - 1425

Bol. Geol.
Ingeominas

Derechos Reservados por:
INGEOMINAS : Instituto Nacional de Investigaciones Geológico - Mineras
Diagonal 53 No. 34-53, Apartado Aéreo 4865
Bogotá 2, D. E., Colombia S.A.

El Boletín Geológico se publica en tres (3) números cada año.
Formato de Publicación: 17 x 24 cm

Editor:

ALBERTO VILLEGAS BETANCOURT

Precio de cada ejemplar	En Ingeominas	\$ 500.00 (US \$ 2.50)
	Vía Aérea	\$ 700.00 (US \$ 3.50)

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	15
1. INTRODUCCION	16
2. ASPECTOS GEOLOGICOS Y MINERIA DE LA ZONA	17
2.1. LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO	17
2.2. OROGRAFIA Y CLIMA	17
2.3. MORFOLOGIA	19
2.4. TRABAJOS PREVIOS	19
2.5. DESCRIPCION DE LA GEOLOGIA DEL AREA ESTUDIADA	21
2.6. ESTRATIGRAFIA	21
2.6.1. FORMACION ARENISCA TIERNA (Grupo Guadalupe)	21
2.6.2. FORMACION GUADUAS	23
2.6.3. FORMACION ARENISCA DEL CACHO	31
2.6.4. SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS RECIENTES	31
2.7. ESTRUCTURAS	31
2.8. SINCLINAL DE CHECUA - LENGUAZAQUE	31
2.9. ASPECTO MINERO DE LA REGION	33
2.9.1. SISTEMA DE EXPLOTACION	33
2.9.2. SEGURIDAD MINERA	33
2.9.3. PRODUCCION	34
3. MUESTREO	35
3.1. METODO DE TRABAJO	35
3.2. ESTADO DE LAS MUESTRAS	36
4. PREPARACION Y METODOS DE ANALISIS	36
4.1. ESQUEMA DE PREPARACION	36
4.2. METODO DE ANALISIS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO	38
5. RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS	41
5.1. DATOS	41
5.2. CONVERSION DE RESULTADOS A OTRAS BASES	41
5.3. ENSAYOS PLASTICOS	45
6. DISCUSION DE RESULTADOS	45
6.1. METODOLOGIA	45
6.2. ANALISIS PROXIMO	60
6.2.1. HUMEDAD RESIDUAL	60
6.2.2. LAS CENIZAS DEL CARBON	64
6.2.3. LA MATERIA VOLATIL	68
6.2.4. CARBONO FIJO	75
6.3. ANALISIS ULTIMO	75
6.3.1. CARBONO	75
6.3.2. HIDROGENO	75
6.3.3. NITROGENO	82
6.3.4. OXIGENO	82
6.3.5. AZUFRE	87
6.4. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES PLASTICAS Y DE HINCHAMIENTO	97
6.4.1. INDICE DE HINCHAMIENTO	97
6.4.2. ANALISIS DILATOMETRICO	100
6.5. ENSAYOS VARIOS	120
6.5.1. PODER CALORIFICO	120

	<u>Página</u>
6.5.2. HUMEDAD DE EQUILIBRIO	123
6.5.3. INDICE DE MOLIENDA - HARDGROVE	123
6.5.4. GRAVEDAD ESPECIFICA	131
6.6. RELACIONES INTERPARAMETRICAS	134
6.6.1. CORRELACION DEL CONTENIDO DE MATERIAS VOLATILES CON ALGUNOS PARAMETROS	134
6.6.2. CORRELACION ENTRE EL CARBONO ELEMENTAL Y OTRAS VARIABLES	142
6.6.3. RELACION DE LAS CENIZAS CON EL PODER CALORIFICO	147
6.6.4. CORRELACION DE LA HUMEDAD RESIDUAL	147
7. CLASIFICACION DE LOS CARBONES DEL SINCLINAL CHECUA - LENGUAZAQUE	150
7.1. CLASIFICACION A.S.T.M. DE CARBONES POR RANGO	150
7.2. CLASIFICACION INTERNACIONAL	150
8. ANALISIS QUIMICO Y FUSIBILIDAD DE CENIZAS	157
8.1. OBJETIVOS	157
8.1.1. ESTUDIO DE LA COMPOSICION DE LAS CENIZAS	157
8.1.2. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE FUSIBILIDAD	158
8.2. METODOLOGIA	158
8.2.1. OBTENCION DE CENIZAS	158
8.2.2. ANALISIS QUIMICO DE LAS CENIZAS	158
8.2.3. DETERMINACION DE FUSIBILIDAD DE CENIZAS	158
8.2.4. CALCULO DE PARAMETROS DE CARACTERIZACION	158
8.2.5. CLASIFICACION DE LAS CENIZAS	159
8.2.6. CALCULO DE FACTORES DE SLAGGING Y FOULING	159
8.2.7. ANALISIS ESTADISTICOS DE RESULTADOS	159
8.3. ANALISIS DE RESULTADOS	159
8.3.1. CLASIFICACION DE CENIZAS	159
8.3.2. ANALISIS QUIMICO DE LAS CENIZAS	160
8.3.3. PARAMETROS DE CARACTERIZACION CALCULADOS	162
8.3.4. CORRELACION ENTRE OXIDOS	171
8.3.5. FUSIBILIDAD	176
8.3.6. CORRELACIONES ENTRE FUSIBILIDAD Y COMPOSICION DE LAS MUESTRAS	180
8.3.7. CORRELACION ENTRE FUSIBILIDAD Y PARAMETROS CALCULADOS.	182
9. LAVABILIDAD	186
9.1. METODO DE ANALISIS DE LAVABILIDAD	189
9.2. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LAVABILIDAD	191
9.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	191
9.4. FORMAS DE AZUFRE	200
10. CONCLUSIONES	209
11. RECOMENDACIONES	213
12. BIBLIOGRAFIA	214
APENDICE 1- FORMULAS ESTADISTICAS	218

FIGURAS

1. Localización geográfica	18
2. Columna estratigráfica generalizada. Formación Guaduas, Sinclinal Checua - Lenguazaque	24

	<u>Página</u>
3. Area carbonífera Checua - Lenguazaque	32
4. Diagrama para preparación de muestras zona Checua - Lenguazaque	37
5. Presentación de histogramas y correlación según las diferentes bases del cálculo.	61
6. Distribución de la humedad residual en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	62
7. Distribución de la humedad residual en la muestra seca al aire, de los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	62
8. Influencia de la humedad sobre el contenido de finos y la variación de la densidad	65
9. Influencia de la humedad sobre la calidad del coque	65
10. Distribución del contenido de cenizas (base seca) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	67
11. Distribución del contenido de cenizas (base seca) de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	67
12. Distribución de la materia volátil (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	71
13. Distribución del contenido de materias volátiles (% s.l.cz.) de las muestras Zona Checua - Lenguazaque	71
14. Correlación del contenido de materias volátiles (b.s.l.cz.) y la profundidad relativa en las muestras de los bloques I y IV de la Zona Checua - Lenguazaque.	72
15. Correlación de materias volátiles (s.l.cz.) y la profundidad relativa en las muestras del bloque II de la Zona Checua - Lenguazaque	73
16. Correlación del contenido de materias volátiles (b.s.l.cz.) y la profundidad relativa en las muestras del bloque III de la Zona Checua - Lenguazaque	74
17. Distribución del carbono fijo (s.l.m.m.) en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	76
18. Distribución del carbono fijo (s.l.m.m.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	76
19. Distribución general del contenido del carbono elemental (b.s.l.cz.) de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	77
20. Distribución del contenido del carbono (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	77

21. Distribución del contenido de hidrógeno (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	80
22. Distribución general del contenido de hidrógeno (s.l.cz.) en la Zona Checua - Lenguazaque	83
23. Distribución general del contenido de nitrógeno (s.l.cz.) en la Zona Checua - Lenguazaque	83
24. Distribución del contenido de nitrógeno (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles en la Zona Checua - Lenguazaque	85
25. Distribución de los valores de oxígeno - en base como se analizó en los carbones	85
26. Distribución de los valores de oxígeno (base como se analizó) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	88
27. Distribución del contenido de azufre (base seca) en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	88
28. Distribución del contenido de azufre (base seca) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua Lenguazaque	90
29. Variación del promedio de algunos parámetros, en base como se analizó, en los bloques de la zona Checua - Lenguazaque	91
30. Variación promedio de algunos parámetros en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	92
31. Variación del promedio de algunos parámetros, en base seca (s.l.cz.) en los bloques de la Zona Checua - Lenguazaque	93
32. Variación del promedio de algunos parámetros en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	94
33. Variación del promedio de algunos parámetros, en base seca (l.s.cz.) en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	95
34. Variación del promedio de algunos parámetros (b.s.l.cz.) en los bloques de la Zona Checua - Lenguazaque	96
35. Distribución general del índice de hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	96
36. Distribución del índice de hinchamiento en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	98
37. Curvas dilatómetricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua Lenguazaque	101

	Página
38. Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguazaque	101
39. Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguazaque	102
40. Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguazaque	102
41. Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguazaque	103
42. Curvas dilatométricas de muestras del bloque I Zona Checua - Lenguazaque.	104
43. Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua - Lenguazaque.	105
44. Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua -Lenguazaque.	106
45. Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua - Lenguazaque.	106
46. Curvas dilatométricas de muestras del bloque III Zona Checua - Lenguazaque.	107
47. Distribución general del porcentaje de dilatación en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	112
48. Distribución del porcentaje de dilatación en los diferentes bloques y niveles de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	112
49. Relación entre valor G y materias volátiles en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	119
50. Relación entre contenido de materias volátiles (b.c.s.a.) y porcentaje de dilata- ción total (contracción + dilatación) en muestras de la Zona Checua - Lengua- zaque	119
51. Relación entre materias volátiles y las temperaturas de ablandamiento (T_1), de máxima contracción (T_2) y de máxima dilatación (T_3)	121
52. Distribución del poder calorífico bruto (base seca) de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	122
53. Distribución del poder calorífico bruto (base seca) en los diferentes bloques y niveles de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	122
54. Distribución del poder calorífico bruto (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	124
55. Distribución general del poder calorífico (s.l.cz.) en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	124

	<u>Página</u>
56. Distribución de la humedad de equilibrio en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque	127
57. Distribución de la humedad de equilibrio de muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	127
58. Distribución del índice de molienda de Hardgrove en los diferentes bloques y niveles	132
59. Distribución del índice de molienda Hardgrove en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	133
60. Distribución de la gravedad específica aparente en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	133
61. Distribución de los valores de gravedad específica verdadera en los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	135
62. Distribución de la gravedad específica verdadera en los diferentes bloques y niveles	135
63. Variación de la gravedad específica verdadera con el contenido de cenizas en base seca de carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	140
64. Relación entre carbono y materias volátiles en muestras de la zona Checua - Lenguazaque	140
65. Relación entre el contenido de materias volátiles (b.s.l.cz.) y el porcentaje de hidrógeno (b.s.l.cz.) en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	141
66. Correlación entre el porcentaje de materia volátil (s.l.cz.) y el poder calorífico (s.l.cz.) en los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	141
67. Correlación entre el contenido de materias volátiles (s.l.cz.) y el índice de molienda Hardgrove en carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	143
68. Relación entre el contenido de cenizas (csa) y el porcentaje de carbono (csa) en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	144
69. Relación entre carbono e hidrógeno en carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	144
70. Relaciones atómicas H/C vs. O/C	144
71. Relación entre carbono (b.s.l.cz.) y poder calorífico (b.s.l.cz.) en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	146
72. Correlación entre poder calorífico y contenido de carbono en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	146

	<u>Página</u>
73. Relación entre el contenido de cenizas (base seca) y el poder calorífico (base seca) en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	148
74. Relación entre la humedad de equilibrio y la humedad residual en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	148
75. Variación del número de hinchamiento con el contenido de humedad seca al aire	149
76. Relación entre el índice de hinchamiento y el contenido de humedad en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	149
77. Ubicación de los carbones de los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque dentro de la clasificación por rango A.S.T.M.	153
78. Ubicación de los carbones de los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque dentro de la clasificación internacional. Bloques V y I . . .	155
79. Ubicación de los carbones de los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque dentro de la clasificación internacional. Bloques II y III.	156
80. Histogramas de Si O ₂ por bloque	167
81. Histogramas de Al ₂ O ₃ por bloque	168
82. Histogramas de Fe ₂ O ₃ por bloque	169
83. Histogramas de CaO por bloque	170
84. Histogramas de MgO por bloque	171
85. Histogramas de Na ₂ O por bloque	173
86. Histogramas de K ₂ O por bloque	174
87. Histogramas de P ₂ O ₅ por bloque	175
88. Histogramas de TiO ₂ por bloque	176
89. Histogramas de SO ₃ por bloque	179
90. Histogramas de % de bases por bloque	180
91. Histogramas de % de ácidos por bloque	182
92. Histogramas de relación base - ácido (Rba) por bloque	183
93. Histogramas de relación sílica por bloque	184
94. Histogramas de relación dolomita (RD) por bloque	185

95. Histogramas de relación silicio-aluminio por bloque	186
96. Histogramas de factor Slagging por bloque	187
97. Histogramas de factor Fouling por bloque	188
98. Histogramas generales	189
99. Histogramas generales	189
100. Histogramas generales	190
101. Comparación de medias de algunas variables por bloque	191
102. Temperatura de deformación inicial en atmósfera reductora vs. % de bases.	196
103. Temperaturas de deformación inicial en atmósfera reductora vs. relación sílica.	196
104. Histogramas de ITR por bloque general	197
105. Diferencia entre temperaturas de deformación inicial en atmósferas reductora y oxidante vs contenido de hierro como % Fe_2O_3	198
106. Diagrama de fases idealizado para dos componentes temperatura de fusión vs. composición	199
107. Temperatura T 250 vs. composición de la ceniza	199
108. Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque I - Zona Checua - Lenguazaque	203
109. Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque II - Zona Checua - Lenguazaque	206
110. Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque III - Zona Checua - Lenguazaque	207
111. Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque V - Zona Checua - Lenguazaque	208

TABLAS

1. Correspondencia de las subdivisiones de la Formación Guaduas	21
2. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores	22
3. Tipos de análisis realizados a los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	39
4. Métodos y normas empleados para el análisis químico de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque	40
5. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque. En base seca al aire (como se analizó). Bloque I	42
6. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque. Base seca al aire (como se analizó). Bloque II	43

	Página
7. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque. Base seca al aire (como se analizó). Bloques III y V	44
8. Fórmulas para conversión de los valores de base como se analizó a las otras bases	45
9. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca. Bloque I	46
10. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca. Bloque II	47
11. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca. Bloques III y V	48
12. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca libre de cenizas. Bloque I	49
13. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca libre de cenizas. Bloque II	50
14. Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua-Lenguazaque, expresados en base seca libre de cenizas. Bloque III y V	51
15. Resultados del análisis de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque, expresados en base seca libre de cenizas. Bloque I y II	52
16. Resultados del análisis de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque, expresados en base seca libre de materia mineral. Bloques III y V	53
17. Resultados de la determinación de Poder Calorífico en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque, expresados en base húmeda libre de cenizas. bloque I, II, III y V	54
18. Resultados de la determinación de Poder Calorífico en las muestras de la zona Checua - Lenguazaque, expresado en base húmeda libre de materia mineral. Bloques I, II, III y V	55
19. Resultado del análisis de Dilatometría de hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque. Bloque I	56
20. Resultado del análisis de Dilatometría e índice de hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque. Bloque II	57
21. Resultado del análisis de Dilatometría e índice de hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque. Bloques III y V	58
22. Humedad residual (base como se analizó) Zona Checua - Lenguazaque (general)	63

23.	Cenizas (base seca) Zona Checua - Lenguazaque (General)	66
24.	Materia volátil (base seca libre de cenizas). Zona Checua - Lenguazaque (General)	70
25.	Carbono fijo (b.s.l.m.m.), Zona Checua - Lenguazaque	78
26.	Carbono (b.s.l.cz.), Zona Checua - Lenguazaque	79
27.	Hidrógeno (b.s.l.cz.), Zona Checua - Lenguazaque	81
28.	Nitrógeno (b.s.l.cz.), Zona Checua - Lenguazaque	84
29.	%oxígeno (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque	86
30.	Azufre (Base Seca), Zona Checua - Lenguazaque	89
31.	Índice de hinchamiento, Zona Checua - Lenguazaque	99
32.	Rango plástico presentado por los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque.	110
33.	Porcentaje de dilatación, d (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.	111
34.	Temperatura de ablandamiento T_1 (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque	114
35.	Temperatura de máxima contracción T_2 (Base como se analizó, Checua - Lenguazaque	115
36.	Temperatura de dilatación máxima T_3 (Base como se analizó), Checua - Lenguazaque	116
37.	Factor G calculado del análisis dilatométrico para los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque	118
38.	Poder calorífico Cal/gr (Base Seca), Zona Checua - Lenguazaque	125
39.	Poder calorífico bruto (b.s.l.cz.), Zona Checua - Lenguazaque	126
40.	Humedad de equilibrio (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.	128
41.	Índice de molienda Hardgrove (base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque	129
42.	Gravedad específica aparente (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque	130
43.	Gravedad específica verdadera (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque (General)	136

44.	Coeficientes de correlación entre los diferentes parámetros de los carbones Checua - Lengua- zaque	137
45.	Relaciones interparamétricas con alta correlación en la Zona Checua - Lengua- zaque	138
46.	Clasificación de los carbones de la Zona Checua - Lengua-zaque Bloques V y I.	151
47.	Clasificación de los carbones de la Zona Checua - Lengua-zaque. Bloques II y III	152
48.	Clasificación A.S.T.M. en porcentajes	154
49.	Distribución en porcentajes de los carbones de la Zona Checua - Lengua-zaque en la clasificación internacional	154
50.	Resultados del análisis químico de cenizas de la Zona Checua - Lengua-zaque	161
51.	Estadísticas de óxidos y parámetros calculados para cada bloque	163
52.	Estadísticas generales de óxidos y parámetros calculados	164
53.	Parámetros calculados en la composición química de cenizas	164
54.	Coeficientes de correlación lineal entre pares de óxidos	172
55.	Resultado del análisis de fusibilidad de las cenizas de los Carbones de la Zona Checua - Lengua-zaque	177
56.	Coeficiente de correlación lineal ITR (1) como indicativo de fusibilidad y al- gunos óxidos y parámetros calculados con base en composición química de las cenizas	181
57.	Características de lavabilidad de los carbones de la Zona Checua - Lengua-za- que. Tamaño de partícula x 4.76 mm. Bloque I	192
58.	Características de lavabilidad de los carbones de la Zona Checua - Lengua-za- que. Tamaño de partícula X 4.76 mm. Bloques II, III y V	193
59.	Comparación del análisis de los carbones brutos y lavados de la Zona Checua - Lengua-zaque	194
60.	Estimativo del problema de lavado basado en el índice ± 0.10 de gravedad es- pecífica	200
61.	Índice ± 0.10 de la gravedad específica de lavado presentados por carbones de la Zona Checua - Lengua-zaque (datos en porcentaje)	201
62.	Resultados de la determinación de Formas de Azufre en algunas muestras de la Zona Checua - Lengua-zaque	202

ANEXOS
(en bolsillo)

1. Mapa Geológico con localización de las muestras.
2. Mapa Geológico con localización de las muestras.
3. Mapa Geológico generalizado. Formación Guaduas.
4. Columna estratigráfica generalizada de los niveles TKg2 y TKg3.
5. Columna estratigráfica general de la Formación. Bloques I y V.
6. Columna estratigráfica. Bloque II.
7. Columna estratigráfica. Bloque III.
8. Localización muestras tomadas.

Los anexos aquí relacionados no se incluyen en esta publicación; su consulta es posible en el Informe No. 1933 de INGEOMINAS.

RESUMEN

Se tomaron 83 muestras de carbón de los niveles estratigráficos TKg2 y TKg3, a través de los bloques V, I, II y III del flanco occidental del Sinclinal Checua-Lenguazaque, muestreadas con pocas excepciones, en frentes de laboreo activos de 32 minas localizadas en los municipios de Cucunubá, Lenguaque y Guachetá (Cundinamarca).

Las muestras fueron preparadas siguiendo un esquema diseñado para obtener porciones representativas, a las diferentes granulometrías requeridas en los análisis.

El estudio realizado incluye la determinación directa de 36 parámetros e indirecta (por cálculo) de 12, correspondientes al análisis próximo, elemental, análisis varios, índice de hinchamiento y dilatometría. También incluye el análisis de los 10 elementos mayores en las cenizas y las temperaturas de fusibilidad en atmósfera oxidante y reductora.

Para los carbones con un contenido de cenizas mayor de 11%, se efectuaron ensayos de lavabilidad y el análisis de las formas de azufre en los resultados en general indican que los carbones de la zona poseen buenas características de lavabilidad y que el azufre orgánico predomina sobre las formas inorgánicas.

Los resultados obtenidos son calculados en las diferentes bases, y para cada variable se efectúa un estudio estadístico, tendiente a establecer las variaciones según el nivel estratigráfico, el bloque y en la zona en general; se calculan para cada caso los parámetros estadísticos más utilizados como medidas de centralización y de dispersión. Se realiza además un estudio correlativo para determinar si cada uno de los parámetros se relaciona con otro, efectuando regresión lineal por el método de mínimos cuadrados en los casos de correlaciones altamente significativas para hallar la ecuación de la relación.

Se encuentra que las siguientes variables aumentan de sur a norte del sinclinal: carbono fijo, carbono elemental, índice de hinchamiento y de molienda, temperaturas de ablandamiento, de máxima contracción y de máxima dilatación, y en menor grado el poder calorífico; mientras que disminuye en este sentido, humedad residual, humedad de equilibrio, y más notablemente, hidrógeno, oxígeno y materias volátiles. De los resultados se concluye que el rango de los carbones aumenta en el siguiente orden: Bloque III, II, I y V. Otros parámetros asumen valores independientes de la ubicación de la muestra en los bloques; tales son: cenizas, gravedad específica aparente y verdadera, nitrógeno, azufre y porcentaje de dilatación. De la misma manera, las tendencias de variación de los diferentes parámetros en los niveles estratigráficos, indican que los carbones del nivel TKg2 tienen mayor grado de carbonificación que los del nivel TKg3.

De la correlación por parejas de variables se concluye que el contenido de materias volátiles relaciona muy bien con la profundidad relativa, y con otros parámetros, particularmente los indicadores de rango, como carbono, hidrógeno y poder calorífico. Los coeficientes de correlación lineal muestran que el poder calorífico, el carbono y las cenizas, son bastantes interdependientes entre sí.

El estudio corrobora que la dilatación total es máxima para un contenido de volátiles de 25 a 30% y que las temperaturas de ablandamiento (T_1), de máxima contracción (T_2) y de máxima dilatación (T_3), aumentan a medida que disminuye el porcentaje de volátiles; mientras T_1 y T_2 obedecen mejor a una relación logarítmica, T_3 disminuye casi linealmente con el aumento de rango.

Mediante la determinación de las relaciones entre propiedades físicas y químicas del carbón, se establece que el índice de molienda aumenta linealmente a medida que crece el rango, dentro de la serie de carbones estudiados, y disminuye con el aumento de cenizas y azufre, como también que la gra-

vedad específica verdadera, a diferencia de la aparente, está estrechamente relacionada con el contenido de cenizas.

Se encuentra además que la humedad residual correlaciona solamente con humedad de equilibrio e índice de hinchamiento y que el contenido de nitrógeno es independiente de las demás variables.

En el estudio de las cenizas de carbón, el análisis de 10 elementos mayores y las correlaciones de éstos entre sí, indica heterogeneidad de aporte mineral, según la localización de la muestra en el depósito; a partir del contenido de estos elementos se calculan ocho parámetros, entre ellos, contenido de bases, ácidos, relación sílice, etc. Algunos de estos parámetros correlacionan significativamente con las propiedades de fusibilidad, dándose así un primer paso en el estudio de la predicción de éstas.

Se encuentran temperaturas de fusión altas para las cenizas, y factores de deposición y encostramiento bajos, indicando que los carbones estudiados no presentarán problemas de acumulación de depósitos en procesos de combustión, y que se pueden usar en sistemas con remoción de cenizas. Los contenidos de fósforo y azufre, indican que el coque obtenido con los carbones de esta zona, cumplan los requisitos que para alto horno y fundición existen a este respecto.

La caracterización realizada permite establecer que aunque los carbones de la zona Checua-Lenguazaque poseen buenas propiedades térmicas, deben utilizarse en coquización, bien sea solos, o en mezclas si se trata de carbones con excesiva dilatación.

1. INTRODUCCION

Cuando alguien está abocado en la tarea de reunir la información existente sobre cierta zona carbonífera y a obtener una visión amplia y completa, se encuentra con varias dificultades. En muchos casos la falta de datos sobre las características de los carbo-

nes de la zona, en otras la dispersión o la falta de uniformidad de las mismas, pues son estudios con criterios de muestreo y metodología en general diferentes; y en el caso más favorable cuando se dispone de un cierto grado de conocimiento, excepción tal vez del Cerrejón, la información es incompleta o parcial.

Se establece entonces la necesidad de adelantar a nivel nacional un programa sistemático que, en primera instancia, permita definir una metodología de trabajo adecuada para la caracterización amplia de nuestros carbones.

El objetivo principal de dicho programa es el de aumentar el conocimiento de cada zona carbonífera, y en este caso particular, del Sinclinal Checua-Lenguazaque, para cubrir no sólo el análisis próximo y la clasificación de los carbones, sino también el estudio de la composición elemental, propiedades plásticas y físicas, naturaleza de las cenizas, su fusibilidad, y el comportamiento del carbón ante el lavado a escala de laboratorio y determinar según las características deducidas, la correcta utilización de este recurso y las posibles alternativas de uso.

Con el presente estudio se pretende fijar la base analítica necesaria para los ensayos a escala piloto y estudios tecnológicos, como también predecir el comportamiento del carbón a nivel industrial en los procesos de manejo, preparación, combustión y coquización, y suministrar suficientes elementos de juicio con miras a la comercialización.

Son también objetivos de este estudio, determinar las variaciones de los diferentes parámetros a través de la zona, proporcionar datos tendientes a establecer correlaciones analíticas, puntualizar sobre la geología del sinclinal, e iniciar con base en toda la información, la sistematización en INGEOMINAS en el campo de los carbones, para contar con archivos confiables que vayan constituyendo un Banco de Datos.

Se preve como etapa inmediatamente posterior del presente trabajo, el estu-

dio petrográfico de las muestras colectadas, de gran interés porque por una parte son muy escasos los datos existentes, y por otra, por tratarse en su mayoría de carbones coquizantes, es un parámetro de gran utilidad.

Los autores agradecen la colaboración de la División de Sistematización del INGEOMINAS y particularmente la prestada por el Ingeniero MANUEL DIAZ, en el procesamiento de datos, como también al Centro del Carbón de la Universidad Nacional en Medellín, entidad que facilitó su laboratorio para la realización de los ensayos dilatómétricos, además de brindar apoyo por parte de su personal profesional y técnico para llevar a cabo dichos ensayos.

2. ASPECTOS GEOLOGICOS Y MINERIA DE LA ZONA

Se describen en este capítulo, la localización del área estudiada y sus características orográficas, climáticas y morfológicas. Se presenta también un resumen de los trabajos geológicos previos, una descripción de la geología, estratigrafía, aspecto minero y finalmente, se dan algunos datos sobre la producción de carbón en la región.

2.1. LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO

El área en la cual se realizó el muestreo, está localizada a unos 80 km al noroeste de Bogotá y se extiende desde el sur de la población de Cucunubá hasta Guachetá. Comprende parte de los municipios de Cucunubá, Lenguaque y Guachetá (Fig. 1).

La vía principal de acceso al área la constituye la carretera pavimentada que comunica a Bogotá con Zipaquirá, Ubaté y Chiquinquirá, la cual continúa al norte hasta la localidad de Barbosa en Santander, donde se une con la vía Bogotá-Bucaramanga.

Existen otras vías sin pavimentar pero en buen estado de conservación, que comunican el área estudiada con las poblaciones de Ubaté, Lenguaque, Villapinzón, Guachetá y Samacá. Igualmente se encuen-

tran otros carretables en regular estado de conservación que conectan los diferentes frentes de laboreo minero con las vías principales. La línea férrea Bogotá-Chiquinquirá, atraviesa el área por el Valle de Lenguaque y en la actualidad está siendo rehabilitada para ser conectada a la futura variante Saboyá (Boyacá) Puerto Mulas (Santander).

2.2. OROGRAFIA Y CLIMA

De acuerdo con la clasificación dada en el mapa ecológico de Colombia (ESPINAL et al., 1963), el área del Valle de Ubaté, al cual pertenece geográficamente la zona estudiada, está comprendida entre las denominadas formaciones Bosque Húmedo Montano y Bosque Seco Montano Bajo.

Una parte del área, en donde se halla el Bosque Húmedo Montano corresponde a lo que se denomina subpáramo, está localizada entre 3.000 y 4.000 m de altura s.n.m., y su temperatura varía entre los 6 y 12°C durante el día, 2 - 5°C durante la noche; el promedio anual de lluvias es de 500 a 1.000 mm; no obstante la baja precipitación, esta zona conserva una humedad alta, pues el gradiente de evapotranspiración es muy pequeño. El resto de la zona, que corresponde principalmente al área del Valle de Ubaté, está comprendida en la Formación de Bosque Seco Montano Bajo, situada entre 2.000 y 3.000 m s.n.m., con temperaturas que varían entre los 12 y 18°C y un promedio anual de lluvias comprendido entre 500 y 1.000 mm.

La parte central del área está atravesada por el río Lenguaque que es afluente del río Ubaté, el cual bordea la parte central y norte de la región estudiada. El río Ubaté desemboca en la laguna de Fúquene lugar de nacimiento del río Suárez. En la parte sur se encuentra la laguna de Cucunubá a la cual va a parar el drenaje de esta región.

Teniendo en cuenta que en esta área afloran de manera alternante rocas duras y blandas (areniscas y arcillolitas), se origina una red de drenaje en enrejado, que se carac-

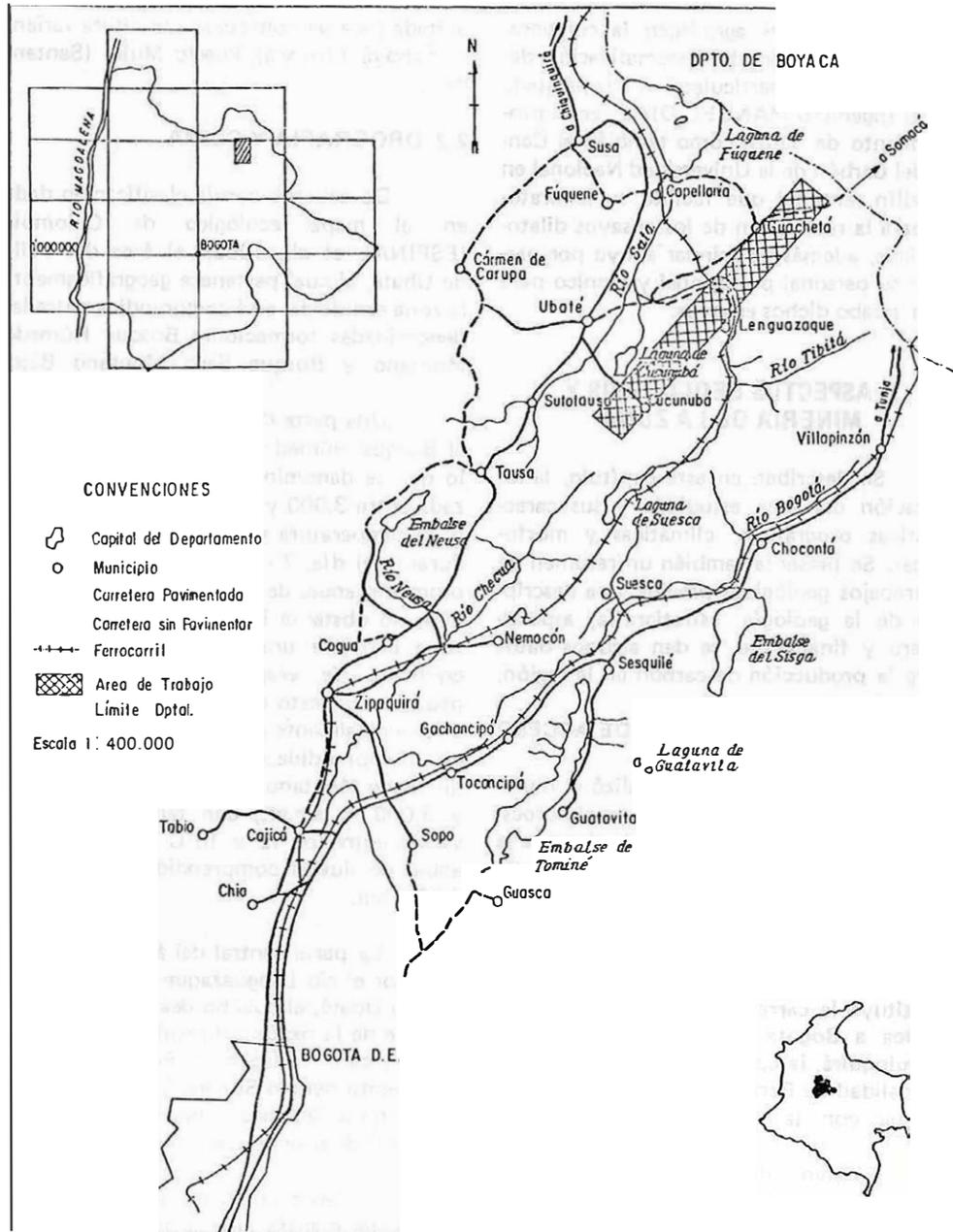


FIG. 1: Localización geográfica.

teriza por presentar un patrón de tipo rectangular con algunas corrientes casi en ángulo recto.

2.3. MORFOLOGIA

La que en un principio se denominó cuenca carbonífera de Checua-Lenguazaque, geográficamente pertenece al Valle de Ubaté-Chiquinquirá el cual forma parte de los altiplanos de la Cordillera Oriental, y está ubicado al norte del Departamento de Cundinamarca y al sur del de Boyacá.

El Valle de Ubaté, es una planicie amplia que se extiende en dirección NE-SW, cubierta por sedimentos de edad Cuaternaria y localizada a un nivel promedio de 2.560 m s.n.m., se halla limitada al este y al oeste por los escarpes que forman las rocas cretácicas.

El área donde afloran los carbones está localizada en el borde oriental del valle y presenta cuatro resaltes o escarpes formados por rocas duras (areniscas), separadas por zonas de rocas blandas que modelan una topografía característica. Hacia los 2.600 m de altura, en la base del valle, aparecen las areniscas potentes de la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe; más o menos a los 3.000 m aparece el segundo escarpe que corresponde a la Arenisca La Guía de la Formación Guaduas, menos potente que el anterior, del cual está separado por unos niveles arcillosos de la parte inferior de la Formación Guaduas.

Sobre la arenisca de la Guía, se presenta un relieve suave, ligeramente ascendente, formado por el nivel arcilloso intermedio de la Formación Guaduas, el cual es interrumpido por la expresión geomorfológica un poco más abrupta de la Arenisca La Lajosa. La parte más alta del flanco occidental sinclinal corresponde al escarpe de la Arenisca del Cacho, que en general está a la altura superior a los 3.400 m. Estas expresiones geomorfológicas son bastantes continuas, extendiéndose a lo largo de todo el flanco occidental del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, presentando sólo pequeñas interrupciones en

los llamados boquerones, posiblemente de origen erosivo, de los valles de Lenguazaque y Cucunubá, que están a la misma altura del Valle de Ubaté, del cual forman parte. Estas interrupciones topográficas de la continuidad del relieve geomorfológico han sido tomadas como límites entre el Bloque I y II (Valle de Lenguazaque), y entre el Bloque II y III (en el Valle de Cucunubá). La división de los Bloques I y V corresponde a una línea imaginaria que va de la Iglesia de Guachetá a la Iglesia de Villapinzón.

Hay que aclarar que, en el presente trabajo no se le da la denominación de Cuenca al Sinclinal de Checua-Lenguazaque, prefiriendo el empleo del término zona carbonífera, por ser más adecuada desde el punto de vista de ambientes sedimentarios.

2.4. TRABAJOS PREVIOS

Por el hecho de que en esta área se presentan en cantidades económicamente explotables los carbones bituminosos de más alto rango de Colombia, es una de las regiones carboníferas más estudiadas, tanto desde el punto de vista de la geología económica como de la investigación geológica propiamente dicha.

El primero que realizó un reconocimiento geológico de la región de Checua-Lenguazaque fue HETTNER (1892), habiéndole asignado el nombre de Piso de Guaduas a la sucesión arcillosa con carbones que afloran en las cercanías de Ubaté, que suprayacen a las areniscas del Guadalupe. La localidad tipo de esta formación, según el autor antes mencionado está en el sinclinal de Guaduas, en las proximidades de la población del mismo nombre.

HUBACH, 1931 (en: LAVERDE, 1979), es quien originalmente define de una manera más exacta la Formación Guaduas, describiéndola como una secuencia sedimentaria concordante, que suprayace a la Formación Guadalupe y está por debajo del horizonte de la Arenisca del Cacho que constituye la base del piso de Bogotá, subdividiéndola en 3 conjuntos a los que se les asig-

na una edad Terciario inferior. Con posterioridad, SCHEIBE (1933) designa como Formación Guaduas a los sedimentos que contienen mantos de carbón en la Sabana de Bogotá.

HUBACH (1957), al describir la estratigrafía de la Sabana de Bogotá, delimita de una manera más precisa la Formación Guaduas, a la vez que le asigna una edad del Maestrichtiano al Paleoceno. Según la descripción hecha, la posición de la Formación Guaduas en la Sabana de Bogotá y sus alrededores, está entre la Arenisca Tierna del Guadalupe superior, en la parte inferior, y la base de la Arenisca del Cacho en su parte más alta. Este autor la divide en tres conjuntos litológicos: el conjunto superior lo forman arcillolitas abigarradas, en las cuales localmente pueden presentarse capas delgadas de carbón sin interés económico; también se presentan niveles no continuos de areniscas arcillosas de grano medio a grueso. El conjunto medio, limitado en su parte superior por el tope de la Arenisca La Lajosa y en la parte inferior por la base de la Arenisca La Guía; esta parte intermedia está constituida por arcillas grises oscuras; es el conjunto que contiene los mantos de carbón que son explotados en el sector de la Sabana de Bogotá. El conjunto inferior, al que se le asigna edad Maestrichtiano, está constituido por arcillas grises oscuras y se encuentra limitado estratigráficamente entre el tope de la Arenisca Tierna de la Formación Guadalupe y la base de la Arenisca La Guía.

VAN DER HAMMEN (1957), mediante un estudio palinológico de la Formación Guaduas le asigna a los conjuntos inferior y medio y a la parte más baja del superior una edad Maestrichtiano, mientras que a la parte más alta le asigna una edad Paleoceno, admitiendo que el límite entre las dos unidades no es claro y definido.

DE PORTA, 1974 (en: LAVERDE, 1979), confirma esta datación con base en la presencia de fósiles.

MOLINA (1963), es quien realiza el primer trabajo regional de geología económica

en el área, haciendo un estudio general de los carbones presentes al norte de la Sabana de Bogotá y en el Departamento de Boyacá.

RADELLI (1967), en su estudio de las cuencas de la Cordillera Oriental sugiere para la Formación la categoría de Grupo.

INGEOMINAS (1969), publicó el mapa geológico del Cuadrángulo K-11, siguiendo las unidades litopetrotigráficas definidas y limitadas por Hubach.

NIGRINIS et al. (1975), establece una nueva división de la Formación Guadalupe, que se sigue en el presente trabajo, que se hizo con el fin de definir los niveles productivos y los no productivos, los cuales fueron fácilmente reconocibles y diferenciados con la cartografía geológica a escala 1:10.000.

Los niveles definidos son los siguientes:

El nivel TKg1, es el más inferior de la Formación Guaduas; está comprendido entre el tope de la Arenisca Tierna y la base de la Arenisca La Guía. El nivel TKg2 corresponde a la Arenisca La Guía. El nivel TKg3 está comprendido entre el tope de la Arenisca La Guía y la base de la Arenisca La Lajosa. El Nivel TKg4 corresponde al conjunto de la Arenisca La Lajosa.

El nivel TKg5 está comprendido entre el tope de la Arenisca La Lajosa y la base de la Arenisca del Cacho.

Una descripción más detallada de las características litológicas de estos niveles se hará en la sección correspondiente a la estratigrafía.

HERRERA y MATEUS (1977) realizaron el censo minero del Sinclinal de Checa-Lenguazaque, siguiendo la cartografía geológica de NIGRINIS et al., 1975.

LAVERDE (1979), divide la Formación Guaduas en 8 conjuntos litológicos, cuya correspondencia con las divisiones estratigráficas hechas por otros autores se muestra en la Tabla 1.

TAB. 1: Correspondencia de las subdivisiones de la Formación Guaduas.

		HUBACH (1957)	NIGRINIS et al. (1975)	LAVERDE (1979)
FORMACION GUADUAS	Arenisca del Cacho			Conjunto 1
	Arcillolitas abigarradas	Miembro superior	TKg5	Conjuntos 2, 3, 4 y 5
	Arenisca La Lajosa		TKg4	Conjunto 6
	Nivel arcilloso con carbones	Miembro medio	TKg3	Conjunto 7
	Arenisca La Guía		TKg2	Conjunto 8
	Nivel arcilloso inferior	Miembro inferior	TKg1	Conjunto 9
Arenisca Tierna				Conjunto 10

2.5. DESCRIPCION DE LA GEOLOGIA DEL AREA ESTUDIADA

En las labores de campo realizadas dentro del programa previsto para el Proyecto de Caracterización de los Carbones del área Checua-Lenguazaque, no se incluyen investigaciones geológicas, pues se consideró que los numerosos trabajos realizados en el área, aportan la información geológica necesaria y suficiente para los objetivos trazados (ver anexos 1, 2 y 3).

Por lo anterior, en este informe solamente se hace una descripción general de la geología del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, haciendo especial referencia en la descripción litológica de la Formación Guaduas y una relación detallada de los mantos de carbón para cada bloque.

El área estudiada pertenece a la cuenca de Cundinamarca y su geología se halla descrita en el Cuadrángulo K-11 (McLaughlin y Arce), publicado por el INGEOMINAS en 1977 a escala 1:100.000; la cartografía geológica que sirvió como base se realizó a escala 1:25.000.

2.6. ESTRATIGRAFIA

En el área estudiada afloran rocas de las formaciones Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe (UJUETA, 1962), Guaduas, Cacho, Bogotá y depósitos no consolidados del Cuaternario (Tab. 2).

2.6.1. FORMACION ARENISCA TIERNA (Grupo Guadalupe)

UJUETA, incluye dentro del Grupo Guadalupe las siguientes formaciones: Arenisca Dura, Nivel de Plaeners, Arenisca de Labor y la Arenisca Tierna, que tiene una edad entre Coniaciano y Maestrichtiano.

En el área correspondiente al Cuadrángulo K-11, McLaughlin y Arce distinguen tres miembros a saber: una arenisca basal, unas limolitas silíceas y una arenisca superior, que dado su espesor se destaca en la Sabana de Bogotá.

La Arenisca Tierna es predominantemente cuarzosa, color gris claro, grano fino a medio, subredondeados y bien seleccionados; no presenta estratificación interna visible; sus contactos son netos y planos. Presenta bioturbación por lo general dispuesta perpendicularmente a la estratificación, de

TAB: 2. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores.

ERA		PERIODO	GRUPO	FORMACION
TERCIARIO	SUPERIOR	PLIOCENO		Tilatá
		MIOCENO		Hiato
	INFERIOR	OLIGOCENO		Usme
		EOCENO		Bogotá
		PALEOCENO		Cacho
				Guaduas
				Tierna
CRETACEO	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO	GUADALUPE	Labor
				Plaeners
		CAMPANIANO		
		SANTONIANO		Cura
		CONIACIANO	VILLETA	Chipaque
		TURONIANO		
		CENOMANIANO		Une
		ALBIANO		
		APTIANO		Fómeque
	INFERIOR	BARREMIANO	CAQUEZA	
		HAUTERIVIANO		
		VALANGINIANO		
		BERRIASIANO		
JURASICO		TITONIANO		

Modificada de Nigrinis, R., et al., 1975.

forma sinuosa y bastante simétrica. Según LAVERDE (1979) corresponden a hipoglifos convexos y se determinan como pertenecientes al grupo etológico Domichnia.

Esta arenisca está en contacto con la parte basal de la Formación Guaduas y dado su potente espesor está bien expresada topográficamente en la región.

2.6.2. FORMACION GUADUAS

Como ha quedado establecido, la Formación Guaduas ha sido objeto de numerosas variaciones en su definición litoestratigráfica, pero en el presente informe se sigue la división estratigráfica dada por NIGRINIS et al. (1975), la cual ha sido corroborada y aplicada en los estudios geológicos adelantados conjuntamente por ADARO, KOPEX e INGEOMINAS. (Fig. 2 y anexo 4).

2.6.2.1. Nivel TKg1.- Corresponde a la sucesión estratigráfica localizada entre el techo de la Arenisca Tierna y la primera de las areniscas de La Guía. Está constituido por una sucesión de arcillolitas grises, finamente laminadas, con intercalaciones de limolitas gris claras en capas delgadas, que predominan en la parte media de este nivel. Se presentan intercalaciones de shales grises oscuros con laminación ondulada lenticular (LAVERDE, 1979).

En la parte inferior de este conjunto, se encuentran arcillolitas grises pardas, intercaladas con shales grises oscuros con laminación fina y areniscas cuarzosas, blancas, de grano fino a muy fino, buena selección del tamaño de grano, estratificación ligeramente ondulada, paralela y continua. Estratificación en capas delgadas.

El contacto basal de este conjunto en general está cubierto. El espesor de este nivel varía de 120 a 200 m, siendo más potente al sur del área estudiada. En las secciones levantadas en el Bloque I, se han encontrado en los 20 m más altos de este nivel, algunas delgadas capas de carbón de espesor no su-

perior a los 0.50 m, en número no mayor de 6, que parecen no tener continuidad lateral.

LAVERDE (1979) observó en la sección medida al norte de Cucunubá, 3 niveles carbonosos, en la mitad inferior del conjunto litológico que él denomina como 9. Estos carbonos alcanzan espesores de techo a base de 0.40, 0.20 y 1.40 m. (Estos niveles de carbón se consideran como parte del TKg2 en el presente informe).

2.6.2.2. Nivel TKg2.- Desde el punto de vista de la geología del carbón, es el nivel más importante de la Formación Guaduas, por ser este conjunto estratigráfico de la Arenisca La Guía donde se encuentran los mantos de carbón bituminoso de más alto rango del área estudiada, principalmente en el sector de los Bloques I y V. (Anexo 5).

Este conjunto está constituido por bancos de areniscas cuarzosas, de color amarillo claro a blanco, de grano fino a medio, localmente grueso, redondeados a subangulares, regular selección del tamaño; contactos netos planos, separados por delgadas capas de arcillolitas oscuras. Alternan las areniscas con arcillolitas grises claras a oscuras, finamente estratificadas y localmente laminadas, frecuentemente con impresiones de hojas. Las areniscas en general son de estratificación fina a gruesa, mostrando algunas veces acuñamientos y marcas de corrientes; se observan también algunas lutitas grises a amarillo claro.

En general los niveles arcillosos constituyen el techo y piso de los mantos de carbón.

En el área correspondiente al denominado Bloque I, afloran 17 capas de carbón de espesor explotable, aunque localmente se pueden presentar aumentos en el espesor de otras capas de carbón que afloran en este nivel, lo que aumenta la cantidad de mantos explotados. En este sector, el nivel tiene un espesor promedio de unos 300 m. (Anexo 5).

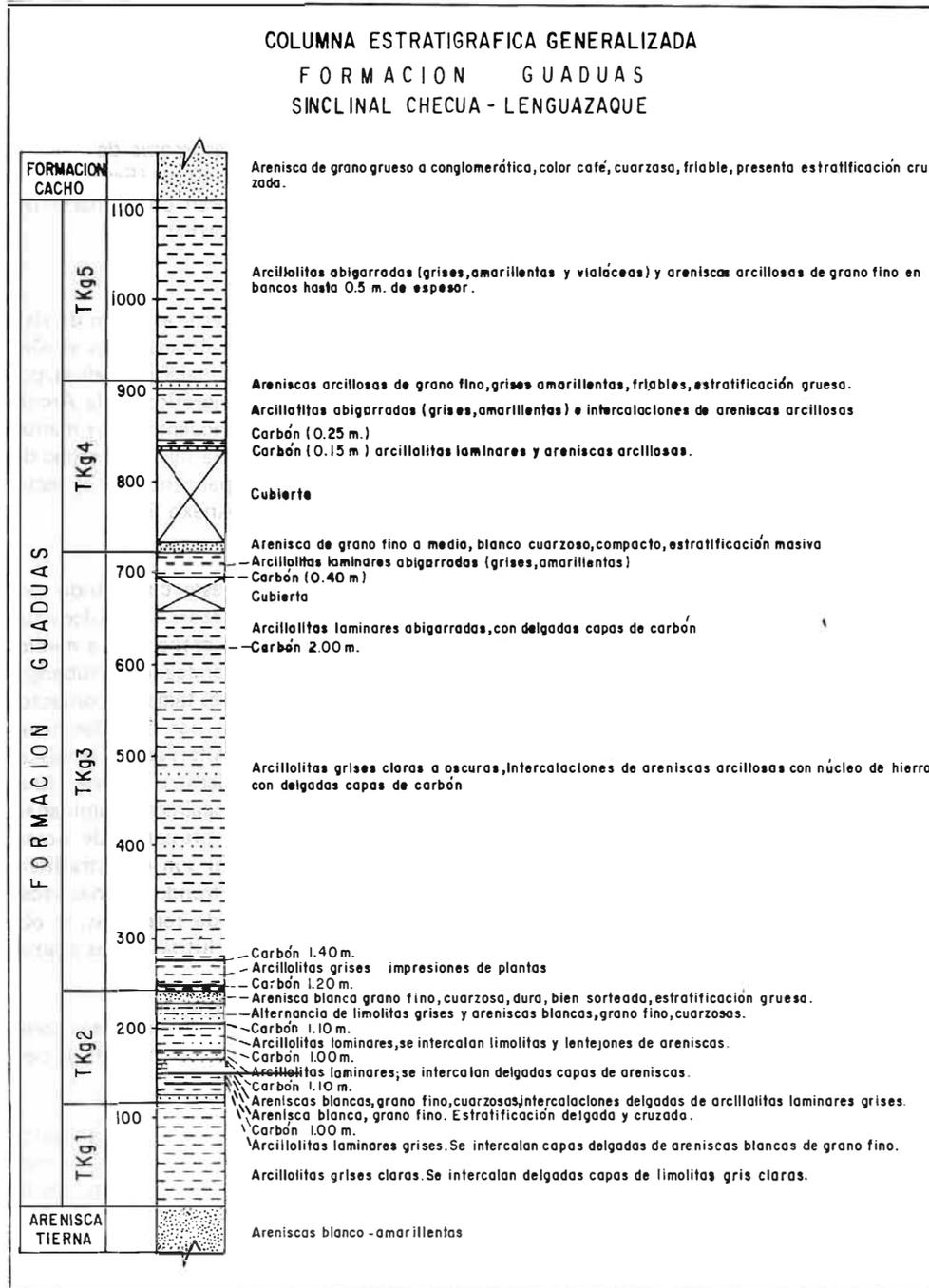


FIG. 2: Columna estratigráfica generalizada. Formación Guaduas. Sinclinal Checua-Lenguazaque.

La capa más inferior es La Cisquera. Se tomaron las muestras GBS-3, 42, 60 y 80. Esta capa presenta un espesor promedio de 1,20 m, siendo más gruesa al sur. Al norte de Guachetá, en la Mina el Cerezo, es cortada por el túnel principal, donde alcanza un espesor de 1,40 m. Localmente presenta espesores hasta de 0,50 m. En la mina Santa Librada se presenta un zuncho (capa delgada de carbón); a unos 10 m estratigráficos por encima del manto que tiene un espesor de 0,50 m y es explotado localmente (Muestra GBS-61).

El Tesoro, es la capa de carbón que se encuentra a unos 20 m estratigráficos sobre La Cisquera. Se tomaron las muestras GBS-2, GBS-62 y GBS-82, en este manto, que tiene un espesor promedio de 0,80 m. En el techo del mismo se encuentran restos de plantas carbonizadas; al norte de Guachetá tiene un espesor de 0,85 m.

La Veta Tesorito (Muestra GBS-63), alcanza un espesor de 0,75 m en la mina muestreada, pero en general tiene un espesor promedio de 0,60 m. Este manto se halla situado a 2 m estratigráficos por encima de la Veta Tesoro.

El manto Milagro (Muestras GBS-1; GBS-81) está a unos 15 m estratigráficos, sobre la capa anterior, presenta un espesor promedio de 0,70 m; al norte de Guachetá (Mina La Mana 1), presenta un espesor de 0,80 m.

El manto Aliso, está a unos 5 m estratigráficos por encima de El Milagro (Muestras GBS-64; GBS-83); tiene un espesor de 0,55 m; localmente puede llegar a 0,70 m de espesor.

El Tobo, es un manto de carbón que sólo en los alrededores de la localidad de Guachetá presenta interés económico. Estratigráficamente, está a 10 m sobre el manto anterior.

El manto La Solapa (Muestra GBS-66), está a uno 6 m estratigráficos más alto que El Tobo. En la mina muestreada, tiene

un espesor de 0,70, presentando dos delgadas intercalaciones arcillosas de 0,05 m la superior y 0,15 la inferior.

El manto Santa Bárbara, está situado estratigráficamente a 20 m por encima de la capa anterior; se tomaron las muestras GBS-65 y GBS-45. En la mina Santa Librada tiene un espesor de 0,50 m. Cinco metros más alto en la secuencia litológica encontramos la capa de carbón denominada Planta de Soda, que tiene un espesor promedio de 0,70 m. En las minas muestreadas al sur de Guachetá, esta capa en general no presenta interés económico, dado su poco espesor. En la mina El Cerezo se tomó la muestra GBS-46, donde presenta un espesor de 0,50 m. En las arcillolitas inmediatamente encima de esta capa de carbón se encuentran hojas y plantas carbonizadas paralelas a la estratificación.

Sobre la capa de Planta de Soda se encuentra el Segundo nivel de Arenisca de La Guña que es bastante continuo en el Bloque I, tiene un espesor entre 8 y 10 m, y se halla estratificado en bancos hasta de 1 m de espesor. Sobre estas areniscas se encuentra la capa de carbón denominada La Gemela constituida por dos mantos, con un espesor total de 1,30 m, separados por una arcillolita gris de 0,10 a 0,50 m de espesor (Muestras GBS-48 y GBS-67). Al norte de Guachetá, en la Mina El Cerezo, este manto se adelgaza, presentando un espesor de 0,40 m.

La capa La Consuelo (Muestra GBS-47, GBS-68), está separada unos 6 m de la capa anterior y su espesor oscila entre 0,50 y 0,60 m; sólo es explotable localmente.

La capa La de Venancio, está separada 11 m de la anterior por una sucesión arcillosa compacta, en general bien estratificada.

La veta La Tercera o El Züncho (Muestra GBS-75), puede ser explotada localmente cuando presenta espesores mayores a 0,50 m; en general presenta un espesor de 0,40 m. ADARO (1978), encontró lamelibranchios de facies marino-lagunar en el techo de este manto de carbón.

Separada de la Veta La Tercera, por una serie de arcillolitas grises de espesor no mayor a 5 m, se encuentra la veta "La de Bolas" cuyo espesor oscila alrededor de 0.50 m. En la Mina Carmen Mejía (Muestra GBS-74), alcanza 0.80 m de espesor. Esta capa presenta unas concreciones ferruginosas redondeadas y por eso los mineros la denominan como La de Bolas.

La veta El Piedro, está separada de la capa anterior por unos 15 m de arcillolitas, en general algo arenosas, que localmente pueden pasar a areniscas cuarzosas. Esta capa de carbón tiene un espesor promedio de 0.80 m, pudiendo localmente alcanzar hasta 1 m. Esta capa es explotada en casi toda el área del Bloque I (Muestra GBS-77). Unos 20 m estratigráficos por encima de la capa anterior, se halla el manto de carbón El Rubí, que coquizan en hornos de colmena y alcanza un espesor promedio de 0.90 m. (Muestra GBS-73, espesor 0.80 m); esta capa se adelgaza hacia el norte.

El Zuncho de la Bocatoma (GBS-78), es un manto delgado de carbón que localmente puede alcanzar los 0.50 m de espesor, y está a unos 10 m estratigráficos por debajo de la capa La Bocatoma.

La Bocatoma, es el manto de carbón más alto en la sucesión estratigráfica del nivel TKg2 en el Bloque I. Presenta un espesor promedio de 0.90 m. En la mina El Carmen Mejía, al sur de la localidad de Guachetá, se adelgaza presentando sólo 0.30 de espesor. En las minas muestreadas al norte de Guachetá, presenta un espesor superior a 1.30. (Muestras GBS-41; GBS-55; GBS-79). En general, todos los carbones localizados por debajo de la Bocatoma (nivel TKg2 del Bloque I) coquizan en hornos de colmena.

Por encima del manto La Bocatoma, aflora el cuarto nivel de Arenisca de La Guía (el tercer nivel está por debajo de la capa El Rubí), cuyo techo se considera como el tope del nivel TKg2.

En el Bloque II, como ha quedado establecido en estudios realizados por

NIGRINIS et al. (1975), corroborado más tarde por ADARO (1978), no existe una continuidad definida de los mantos del nivel TKg2 a lo largo de toda el área del sinclinal, circunstancia que se acentúa en las proximidades de los valles de Lenguaque (separación de los Bloques I y II) y de Cucunubá (separación de los Bloques II y III), que hace que no se presente una correlación definida entre los mantos que afloran en cada uno de los bloques. Esto ha hecho necesario definir columnas estratigráficas ideales para cada uno de los bloques, sin que hasta el momento haya sido posible realizar una correlación general de los mantos de carbón en el Sinclinal de Checua-Lenguaque. Aunque es un hecho que en general no exista una solución definida en la continuidad de los mantos de carbón, esto no elimina la posibilidad de que algunos de los mantos presenten continuidad en toda el área del sinclinal estudiado.

En el Bloque II, el nivel TKg2 presenta en general 10 mantos de carbón explotables; es necesario aclarar que localmente se pueden presentar incrementos en los espesores de los mantos, lo que hace que aumente el número de capas de carbón que se laboran en el área; en general se puede apreciar que en la parte sur del bloque se aumenta el espesor de los mantos, llegando a ser explotables 14 capas, aunque no de manera continua. (Anexo 6).

En esta zona aflora el manto de carbón 5b, por debajo de la Arenisca de La Guía, por lo que es conveniente definir como límite inferior del TKg2 la base de este manto de carbón, aunque por debajo del mismo y dentro de un paquete de 10 m de arcillolitas grises se presenten dos delgados niveles carbonosos.

Tomando en cuenta la sugerencia de ADARO (1978), en el presente trabajo se coloca el límite inferior del TKg2 en este manto, quedando la sucesión estratigráfica de base a techo de la siguiente manera:

Capa de carbón 5b (Muestras GBS-22; GBS-33), este manto varía de espesor

de 0.70 a 1.00; es una capa de carbón sin intercalaciones de estériles, aunque presenta como todos los carbones del área, bandeamiento paralelo a la estratificación por la alternancia de diferentes litotipos del carbón, predominando el vitreoso. Manto 5a, está a unos 8 m sobre el manto anterior, separado por un nivel de arcillolitas grises, algo arenosas. (Muestras GBS-23; GBS-32). El espesor varía de 0.70 a 0.90 m.

El manto 4b (Muestra GBS-52) en la mina La Ramada, tiene un espesor promedio de 0.80 m; es un manto de carbón que no presenta intercalaciones de estériles. Este manto está a unos 20 m estratigráficos por encima del manto anterior, estando separado de éste, por un nivel de arcillolitas grises con algunas intercalaciones de areniscas arcillosas, con grano de cuarzo de tamaño fino.

Manto 4a (Muestra GBS-53); en la mina La Ramada, lugar donde se tomó la muestra tiene 0.80 m de espesor y está a unos 7.00 m sobre la capa anterior, separada por arcillolitas de color gris.

Manto 3c, está a unos 10 m sobre el manto anterior. En general es un zuncho de espesor inferior a 0.40, que sólo localmente (Mina La Ramada, nivel Cerezo), presenta un espesor de 0.60 m (Muestra GBS-51).

Sobre este manto se presenta una sucesión de 25 m de arcillolitas de color gris, finamente laminadas, con delgadas intercalaciones de limolitas de color gris claro. Se interrumpe esta secuencia sedimentaria, con una arenisca cuarzosa de unos 5 m de espesor, de grano fino a medio, bien seleccionado, algo friable; siguen luego 35 m de arcillolitas de color gris, bien laminadas, estratificación fina.

Manto 3 (Muestras GBS-21, 25 y 35); corresponde a la veta El Cajón que es explotada más al sur de la mina La Ramada, tiene un espesor promedio de 1.20 m, aunque

puede alcanzar 1.40 m. Este manto es bastante explotado en la zona del Bloque II.

Manto 2D (Muestras GBS-36; GBS-54). Es un zuncho que localmente presenta aumento en su espesor, llegando a unos 0.50 m; está localizado estratigráficamente a unos 10 m sobre el manto 3.

Manto 2 (Muestras GBS-26, 34 y 39). A este manto también se le denomina La de 70, por presentar en general un espesor de 0.70 m. En las minas muestreadas alcanza un espesor de 1.05 m; por lo general presenta una delgada intercalación arcillosa; es muy explotado en el Bloque II, en especial en la parte central del mismo. Entre este manto de carbón y el Manto 1 (o La de 90), que se encuentra unos 50 m estratigráficamente más alto, se presenta un nivel arenáceo, que corresponde a un tercer conjunto de la Arenisca de La Guá. En general en el área del Bloque II, el nivel TKg2, es menos arenoso que en el Bloque I, siendo las areniscas menos potentes, y en general más arcillosa la secuencia litológica.

Manto 1a o La de 90 (Muestras GBS-20, 27); bastante explotado en el área, presenta un espesor promedio de 0.90 m; según ADARO (1978), en las arcillolitas que se encuentran en el techo de este manto abundan las pistas de anélidos (bioturbación). Suprayace a este manto el nivel arenoso más alto del TKg2, en el Bloque II.

Los mantos por debajo de este nivel (5b, 5a, 4b, 4a, 3a y El Cajón) son coquizados en hornos de colmena en el área correspondiente al Bloque II.

Como puede apreciarse en el mapa No. 2 del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, la mayoría de las muestras colectadas en el Bloque III corresponden al extremo norte del mismo, en las cercanías del Valle de Cucunubá. En esta área afloran 5 mantos explotables. Como en el bloque anterior, se toma la veta 1 de 1.20 de espesor promedio, como límite inferior del nivel TKg2. Este nivel está compuesto principalmente por areniscas, de color gris claro, con granos de

cuarzo predominante de tamaño fino a medio, buena selección del tamaño y composición; tiene contacto neto y plano con las capas que le suprayacen e infrayacen. Se observan marcas de oleaje y en ocasiones estratificación cruzada. La sucesión estratigráfica continúa de la siguiente manera:

Veta La Primera, tiene un espesor de 1.20 m en promedio. Suprayace a esta veta un nivel arcilloso de unos 3 m de espesor, sobre la cual se halla un nivel de areniscas de 6 m de espesor. (Anexo 7).

Veta La Segunda; está unos 20 más alta que la anterior. Es un manto de carbón de espesor promedio de 1.30 m; en la mina donde se tomó la muestra GBS-71, tiene 0.70 m de espesor.

Veta Chica; está a unos 40 m sobre el manto anterior, separada por un nivel de arcillolitas de color gris, finamente estratificadas (Muestra GBS-70), que generalmente presenta un espesor superior a 1.30 m.

Veta La Tercera; está a unos 40 m sobre la veta Chica, tiene un espesor promedio de 1.20 m. La muestra GBS-9, corresponde a esta veta; fue tomada en un sector donde se presenta un pinchamiento en el manto de carbón (zona de Falla?); el espesor medido es de 0.80 m.

Veta Grande; varía de espesor de 0.90 a 1.50 m, y su espesor promedio es de 1.20; está separada de la anterior por unos 10 m de arcillolitas de color gris, finamente laminadas (Muestra GBS-13). Sobre esta capa de carbón afloran dos niveles potentes de arenisca, que están separados por una arcillolita de color gris y shales, de unos 20 m de espesor. El techo de la arenisca más alta, corresponde al tope del nivel TKg2 en el Bloque III, y es bastante continuo en todo el sector.

2.6.2.3. *Nivel TKg3.*- Corresponde a la sección sedimentaria comprendida entre el último nivel de la

Arenisca La Gufa y la base de la primera arenisca La Lajosa; está conformado en su mayor parte por arcillolitas grises claras, laminadas y en ocasiones carbonosas que presentan algunas veces costras duras de material ferruginoso, principalmente en las superficies de meteorización. Estas arcillolitas laminadas fisibles, contienen restos de plantas carbonizadas. En la parte inferior de este nivel predominan las arcillolitas de color gris, finamente laminadas, que alternan con areniscas cuarzosas, de color amarillo claro, algo arcillosas, de grano fino a medio, en general con buena selección del tamaño de grano; en ocasiones presentan marca de oleaje. En la parte intermedia de este nivel se presenta una secuencia de arcillolitas masivas, poco bandeadas, de color gris; en superficies de meteorización color amarillo a rojizo, se encuentran nódulos limolíticos hasta de 25 cm de diámetro y costras limoníticas de color castaño oscuro, de aspecto lenticular, muy duras. Se presentan areniscas cuarzosas, algo arcillosas, interestratificadas en bancos por lo general de espesor no mayor a 2 m. Alternan también limolitas de color gris a amarillento, en láminas medias a gruesas. En la parte más alta del TKg3, predominan las limolitas que alternan con potentes paquetes de arcillolitas de color gris, con algunas intercalaciones de areniscas. Morfológicamente el nivel TKg3 se expresa con topografía suave, que contrasta con la topografía de los niveles TKg2 y TKg4, que dan expresión morfológica más abrupta.

En el Bloque I el nivel TKg3 presenta 4 mantos explotables de carbón, aunque localmente puede presentarse ensanchamiento de algunas capas generalmente delgadas, elevándose a siete los mantos explotables. (Anexo 5).

En esta área el espesor de este nivel puede ser de unos 250 a 300 m y sólo en los 50 m superiores se encuentran los carbones de interés económico. Al norte de Guachetá se presenta a unos 20 m más alto que la última arenisca de La Gufa, un manto de carbón de 0.80 m de espesor. Este manto fue muestreado (GBS-56), en la mina Laberinto

1, y está localizado estratigráficamente 60 m por encima de la veta La Bocatoma (nivel TKg2).

Unos 200 m sobre el contacto con el nivel TKg2, se encuentra un zuncho, que en general posee un espesor de 0.35 a 0.40 m que en las minas de Hulleras, La Ramada y Guachetá, al sur del Bloque I presenta un espesor de 0.80 m.

La veta La Depósito, se encuentra unos 5 m más alta en la sucesión estratigráfica que la veta anterior. En la parte norte del Bloque I y al norte de Guachetá no presenta interés económico (GBS-31 y GBS-58).

Veta La Cisquera del Santuario (GBS-14; 18, 28, 30 y 57). Este manto es bastante explotable en toda la región, presenta un espesor que oscila entre 1.20 y 1.80 m y está localizado a unos 30 m por debajo de la base de la primera arenisca La Lajosa. Por debajo de este manto, a 5 y 7 m aproximadamente, se encuentran los zunchos No. 1 y No. 2 (correspondientes a las muestras GBS-16 y GBS-17), los que fueron muestreados en la mina La 33, donde presentan espesores de 0.50 y 0.62 m respectivamente.

Manto 7 Bancos (GBS-15, 19, 29 y 59). Se trata en esta área de un manto de carbón que presenta en su parte inferior alternancia de carbón y arcillolitas, y una parte superior más potente sin intercalaciones arcillosas. Este manto tiene un espesor que varía entre 0.70 y 1.20 m. Es el nivel carbonoso más alto estratigráficamente del TKg3 en el Bloque I.

En el Bloque II, el nivel TKg3 (ver Anexo 6) se presenta un manto de carbón de espesor promedio de 2 m, hacia la base de este nivel estratigráfico, llamado veta La Principal (manto Cero en la mina La Ramada de Lenguaque); se compone de dos capas de 0.30 y 0.80 m de espesor, separadas por un estéril arcilloso que varía de 0.30 a 0.60 m (Muestras GBS-10; 24, 37 y 40). En la mina La Ramada Baja (GBS-24), este manto

alcanza un espesor de 0.60 m y 1.00 m y las dos capas se hallan separadas por 0.15 m de arcillolitas grises.

Hacia el sur del Bloque II se presenta una veta de 1.20 m de espesor promedio, localizada unos 30 m estratigráficos sobre el manto o veta La Principal. En la mina Las Cajitas (GBS-38), lugar donde se tomó muestra de este manto, se presentan dos capas de carbón de 0.30 y 0.80 m separadas por 0.10 m de arcillolitas. Esta veta se le conoce en el área como La de 1.20.

Sobre la sucesión anterior, siguen unos 150 m de arcillolitas grises, que alternan con areniscas arcillosas, de grano fino a medio y niveles de limolitas. Afloran algunas capas de carbón de espesor inferior a los 0.40 m, por lo que no presentan interés económico. Se presentan niveles arcillosos en los que hay abundancia de restos e impresiones de hojas paralelos a la estratificación.

Veta La Depósito o veta Chica; se compone en general de dos niveles de carbón de 0.15 y 0.60 m, separados por una intercalación arcillosa de 0.20 m; hacia el sur del área estudiada, alcanza un espesor total de 1.80 m.

Unos 10 m estratigráficos sobre el manto anterior, se encuentra la veta Grande o Cisquera 2a, de espesor más constante que el anterior (Muestra GBS-50). En general se trata de dos capas de carbón de 0.60 m y 0.70 m, separadas por arcillolitas de 0.10 m de espesor. En promedio los espesores varían entre 1.50 y 1.70 m. Luego, 30 m más alta estratigráficamente, se encuentra la veta Siete Bancos. En el área ocurren 3 niveles carbonosos principales de 0.50, 0.70 y 0.80 de espesor, separados por intercalaciones arcillosas hasta de 0.50 m.

El manto La Vidriosa, que localmente puede alcanzar hasta 1 m de espesor, es el nivel carbonoso más alto de TKg3; está unos 30 m más alto que la veta anterior. En la parte norte es muy irregular en su espesor, por lo que no se explota en este sector.

El nivel TKg3 en el Bloque III, es bastante espeso pudiendo alcanzar hasta 400 m. Se inicia con un manto de carbón explotable que está próximo a la arenisca más alta del nivel de La Guía, y corresponde al manto 7 de la mina Montecristo (Muestra GBS-7) o a la Siete Bancos Inferior, de las minas localizadas más al sur. Es un manto de espesor promedio de 1.50 pudiendo alcanzar hasta los 2 m. Presenta varias intercalaciones de estériles, de espesor no mayor a 0.30 m, generalmente de shales carbonosos, por lo que son difíciles de diferenciar. Sigue un nivel de arcillolitas color gris, bien laminadas, de unos 20 m de espesor. Presentan impresiones de hojas.

Estas arcillolitas infrayacen a la veta X, que localmente puede llegar a tener un espesor de 0.70 m pero que en general posee poca potencia, por lo que no es explotada de forma continua en el área.

A unos 30 m estratigráficamente por encima de la veta X, se encuentra la veta Grande (Muestra GBS-8), con un espesor promedio de 2 m, siendo bastante continua en el sector.

La veta Chica (GBS-11); se encuentra subyaciendo a una arenisca cuarzosa de color amarillo claro, de grano fino, buena selección del tamaño, de unos 10 m de espesor; este nivel arenoso está a unos 35 m más alto estratigráficamente que la veta Grande. La veta Chica es un manto de carbón de espesor promedio de 0.90.

La veta La Depósito; de espesor promedio de 1.60 m, en la actualidad no se trabaja en el sector de la mina Montecristo, en la cual se efectuó el muestreo en el Bloque III. Está localizada estratigráficamente unos 30 m más alta que la veta anterior.

La veta La Chiquita (GBS-12); es un manto de carbón de 0.70 m de espesor promedio, y está a unos 20 m estratigráficamente más alta que la veta La Depósito.

La veta La Ciscuda; está separada del manto anterior por unos 30 m de arcilloli-

tas grises, mal laminadas; es un manto de 1.80 m de espesor, muy trabajado en este sector. Encima de esta veta sigue una sucesión de unos 200 m de arcillolitas de escaso bandeamiento de color gris a amarillo rojizo, que alternan con limolitas cuarzosas de poco espesor.

La veta La Vidriosa; es un manto de carbón de espesor de 0.70 m (Muestra GBS-6); es un carbón duro y de apariencia vítrea (vitreno predominante).

El manto La Depósito está separado por unos 25 m de arcillolitas muy poco bandeadas (Muestra GBS-4). Posee un espesor promedio de 1.00 m, aunque localmente puede llegar a ser de 0.80 m de espesor. Sobre esta veta se presenta un nivel de aproximadamente 5 m de arcillolitas masivas con abundantes impresiones de hojas.

La veta Siete Bancos Superior; es un manto de carbón bastante continuo en el área, con un espesor promedio de 2 m. En la mina El Alcalde (Muestra GBS-5), presenta un grosor de 2.30 m. Este manto presenta varias intercalaciones arcillosas, finamente laminadas y muy ricas en restos vegetales carbonizados, muy difíciles de separar por lo que este carbón se explota con un contenido de cenizas alto. La veta Siete Bancos Superior, constituye el manto de carbón más alto del nivel TKg3 del Bloque III.

2.6.2.4. Nivel TKg4.- En la parte inferior de esta secuencia predominan las areniscas cuarzosas, de color blanco a amarillentas, de grano fino a medio, subredondeadas, bien seleccionadas; contactos generalmente planos, aunque suelen presentarse algo ondulados; localmente pueden presentar acunamientos y estructuras biogenéticas, que según REINO y ROJAS (1981), están dispuestas de manera paralela a la estratificación (Damichnia) y existen posibles huellas de reptación de organismos (Repichnia). Los niveles arcillosos se encuentran intercalados con niveles delgados de areniscas arcillosas bien estratificadas; contacto neto y plano tanto en el techo como en la

base. Láminas gruesas medianamente compactas. Se presentan esporádicos mantos de carbón de espesor no mayor a 0,40 m que parecen no tener continuidad lateral. Este nivel comprende a la Arenisca La Lajosa. El espesor varía de unos 200 m en la parte norte del área estudiada a unos 700 m al sur de la localidad de Cucunubá.

2.6.2.5. Nivel TKg5.- Esta es la secuencia sedimentaria estratigráficamente más alta de la Formación Guaduas y como el TKg1, se caracteriza por la ausencia de capas de carbón. Está constituida por unos 150 a 250 m de espesor de arcillolitas abigarradas, con intercalaciones esporádicas de areniscas cuarzosas, de color amarillento a rojizo, de grano fino a grueso, angular a subredondeado; mala selección del tamaño del grano, matriz arcillosa, cemento ferruginoso; presenta además estratificación interna discontinua; contacto transicional plano en la base del conjunto. Por ser un nivel blando, morfológicamente da una expresión topográfica de suave relieve.

2.6.3. FORMACION ARENISCA DEL CACHO

Esta compuesta por areniscas cuarzosas, con limonita y hematita como minerales pesados, de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte inferior de la secuencia y grueso en los niveles superiores, presentándose en ocasiones localmente conglomerática; grano redondeado a subredondeados, matriz arcillosa, cemento ferruginoso, estratificación interna continua. Es muy frecuente la estratificación cruzada y las marcas de corriente en los niveles superiores. Hacia la parte intermedia de este nivel se halla un horizonte de arcillolitas grises y blancas con estratificación fina a delgada, presentando en superficie de alteración un color rojo a rosado. La base de esta arenisca marca el límite superior de la Formación Guaduas.

2.6.4. SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS RECIENTES

Extensiones considerables de material aluvial de edad cuaternaria, se han depositado en los valles y tierras bajas; principalmente ocupan el área del valle de Ubaté y los Boquerones de Lenguaque y Cucunubá, cubriendo los depósitos más antiguos. Este material es de origen fluvial, lacustre y fluvio-glacial; forma las zonas planas características del altiplano.

Detritos muy dispersos y en general no cartografiables de naturaleza arenosa se producen localmente en la zona carbonífera, llegando a cubrir en algunos sitios los mantos de carbón.

2.7. ESTRUCTURAS

En general la geología estructural del área estudiada es bastante sencilla, presentándose un pliegue principal, el Sinclinal de Checua-Lenguaque, de rumbo promedio N40°E. Los pliegues presentes en la región estudiada, fueron causados por la orogenia intraterciaria que causó el levantamiento y plegamiento de la Cordillera Oriental de la Región Andina de Colombia. Los ejes en general cabecean a ambos extremos del pliegue principal sin que hayan sido afectados por fallas longitudinales de gran desplazamiento. Se presentan algunas fallas de menor desplazamiento, longitudinales y transversales que localmente pueden complicar la estructura general (Fig. 3).

2.8. SINCLINAL DE CHECUA-LENGUAZAQUE

Se trata de una estructura asimétrica y presenta una dirección general noreste, cuyo flanco oriental se encuentra más inclinado que el occidental. En el flanco occidental, que es el lugar donde se efectuó el muestreo para el presente trabajo, afloran los estratos siguiendo un rumbo general N40°E

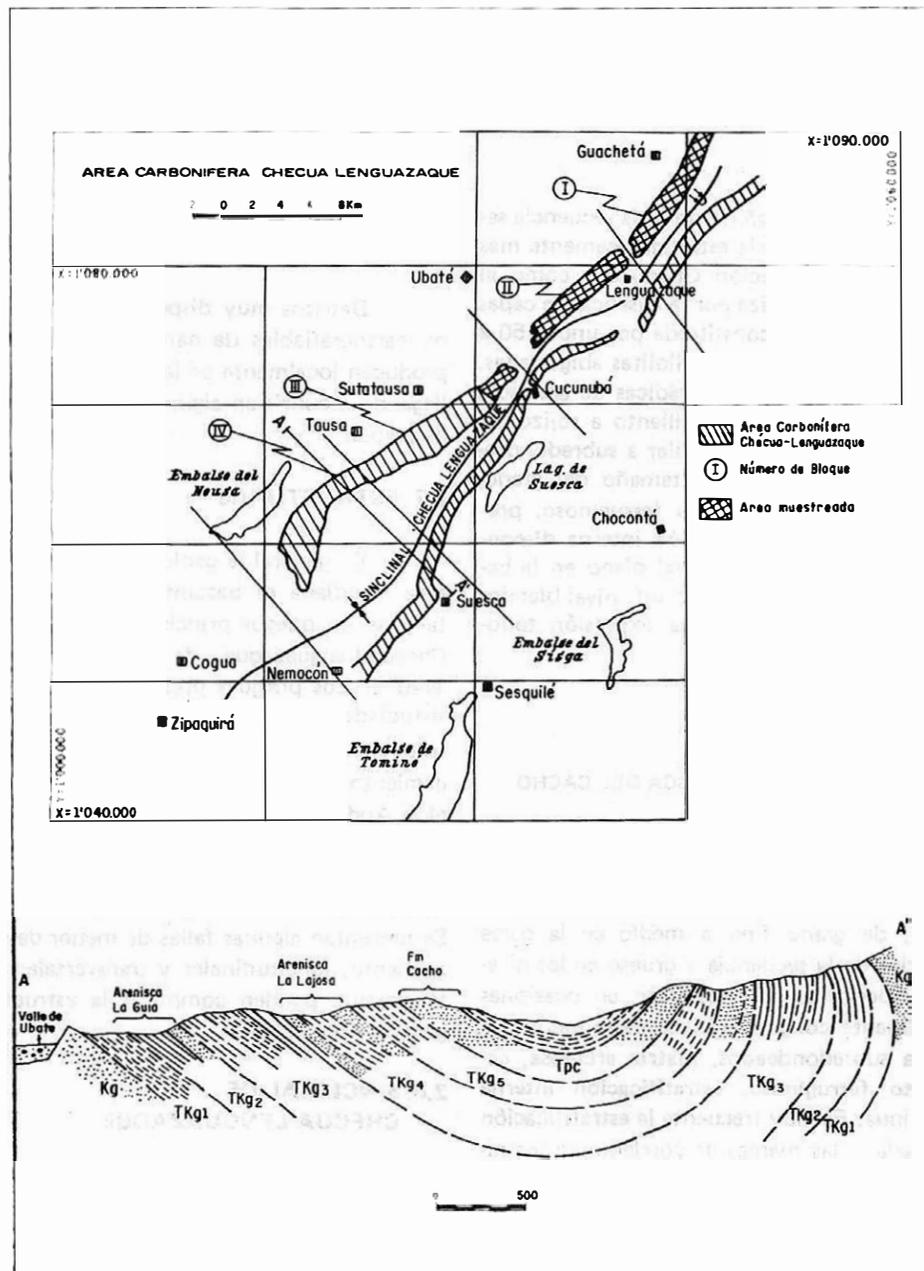


FIG. 3: Area carbonífera Checua-Lenguazaque.

con buzamientos que van desde los 70° en el sector de Guachetá hasta 35° en el sector de Cucunubá. Estos buzamientos se suavizan aún más en las cercanías del eje, siendo en general menos inclinados los mantos más superiores del nivel TKg3 que los más inferiores del TKg2 (Ver anexos 1, 2 y 3).

Los buzamientos de los estratos del flanco oriental son más fuertes llegando hasta 85°, siendo frecuentes las inversiones por gravedad. Por presentar una tectónica más complicada y buzamientos cercanos a la vertical, este flanco en general ha sido menos explotado que el occidental. La distancia entre los dos flancos del sinclinal no es constante; así en el área correspondiente al Bloque II (Sector Lenguaque-Cucunubá), se presenta un estrechamiento bastante fuerte, llegando a estar separados los dos flancos apenas 3.5 km, mientras que al sur de Tausa llega a tener hasta 12.0 km. En general el flanco oriental está más disturbado por fallas, que sólo interrumpen localmente las explotaciones.

2.9 ASPECTO MINERO DE LA REGION

Las minas en el área son numerosas; no se sigue un patrón definido en su sistema de explotación. Por lo general son pequeños frentes de laboreo minero, de tipo artesanal, que no presentan un planeamiento adecuado y el desarrollo es muy incipiente, siendo su grado de mecanización muy rudimentario.

2.9.1. SISTEMA DE EXPLOTACION

Para la extracción del carbón se emplea una variación del sistema de explotación de cámaras y pilares (Rooms and Pillars), el cual consiste en hacer tambores ascendentes por el buzamiento del manto cada 10 a 15 m, los que a su vez son cortados por galerías auxiliares paralelas al rumbo, separadas entre 10 a 15 m. Cuando se avanza en las labores mineras, estos machones de carbón son explotados hasta la mitad aproximadamente; una vez concluido el avance, se retrocede descuñando, recuperando la madera y demás elementos que puedan ser utiliza-

dos nuevamente y también se van tumbando los machones de carbón que se habían dejado en la etapa inicial, para el sostenimiento de los espacios dejados en la mina para ventilación y transporte, extrayéndose el carbón que se había utilizado como pilar, dejando así que las rocas del respaldo se derrumben libremente.

El desarrollo de la mina se inicia con un inclinado de 100 a 200 m de longitud. Hoy en día es más frecuente la apertura de túneles o galerías a nivel, que cortan varios mantos de carbón. Este tipo de vía principal de transporte dentro de la mina facilita tanto el desagüe de la mina, como la operación de los coches en que se transporta el carbón, los que en general son de madera y de tracción humana, y que ruedan sobre rieles en general de madera. En las minas más tecnificadas se tienen rieles de acero y coches metálicos; sólo en una mina de la región, se emplean locomotoras Diesel para el descargue de los tajos de explotación.

Para efectos de la ventilación, cada 3 a 5 tambores de explotación (cada 50 m (aproximadamente), se comunica una de ellas con la superficie, lo que constituye "un bocaviento", el cual es entibado en "cuadros de madera". Estos tambores de ventilación son abiertos siempre en sentido ascendente, para facilitar el descargue.

La explotación siempre se realiza de manera descendente a partir de un nivel superior, con el fin de aprovechar la gravedad para el descargue. Usualmente el arranque del carbón se realiza a pico y pala; unas pocas minas emplean martillos neumáticos para la extracción del carbón. Cuando se avanza los túneles en estéril, en general rocas más duras, se emplea dinamita, aunque el consumo de explosivos en la región es en muy pocas cantidades.

2.9.2. SEGURIDAD MINERA

La entibación o sostenimiento de las vías principales de la mina, se hace por medio de puertas de madera, aunque hay fren-

tes de laboreo, y en especial en las galerías en las que se deja la roca del respaldo superior del manto para su sostenimiento. En las minas más pequeñas y donde los respaldos son consistentes no hay entibado.

En las minas mejor desarrolladas (donde las vías permanecen más tiempo abiertas), es necesario el cambio de los capis o madera del techo de la puerta, debido a las fuertes presiones a que es sometida, siendo mayor la cantidad de puertas. Uno de los problemas más frecuentes de la minería del área es el agua, que se acentúa aún más en las minas en las cuales se labora en contra de la gravedad. En general se emplean bombas con motor de gasolina que llenan con gases venenosos los frentes de laboreo minero. En las minas más pequeñas del área, el desague de los frentes se realiza mediante el empleo de canecas. Vale la pena anotar que existen numerosos frentes que se han inundado debido a la carencia de los equipos adecuados, por lo que han sido abandonados, sin haberse extraído la totalidad del carbón.

En general, el alumbrado de las minas se realiza mediante el empleo de lámparas de carburo, que es altamente peligroso, porque al contacto de la llama con el gas grisú (en concentraciones apropiadas), se produce una explosión. Sólo algunas pocas minas del área emplean lámparas eléctricas. En algunas minas las vías principales están alumbradas por bombillas eléctricas normales, sin que estén protegidas de forma adecuada para evitar la explosión. Las redes eléctricas tampoco ofrecen seguridad apropiada. No existe control sistemático y adecuado de gas, por lo que, debido a la deficiente ventilación, es posible que se presenten acumulaciones de gases, tanto de tipo explosivo, como de características letales.

2.9.3. PRODUCCION

La producción de carbón del área corresponde aproximadamente a un 35% de los carbones coquizables que se producen en el país, que a su vez representan tan sólo un 12% del total de 4.915.000 toneladas/año del carbón producido en Colombia en 1983; el

86% restante corresponde a carbones reconocidos como de uso térmico.

Como ha quedado establecido, la minería en el área se realiza por explotaciones bajo tierra, en las cuales el nivel técnico, tanto en la explotación como en el transporte es muy rudimentario, empleando para las labores de arranque el pico en un 90% de las minas del área; el 5% ayudan al arranque de carbón con el uso de explosivos (en general dinamita); sólo el 5% emplean martillos neumáticos. El mayor número de las minas del área (aproximadamente un 92.7%) producen menos de 6.000 toneladas anuales de carbón; un 4.5% de las minas tienen una producción aproximada a las 10.000 toneladas anuales y sólo 2.8% tienen una producción entre 10.000 y 30.000 ton/año.

Según el Censo Nacional de Carbón, publicado por CARBOCOL en 1983, en el área del Sinclinal de Checua-Lenguazaque, se extraen anualmente 798.097 toneladas de carbón, de las cuales 240.328 toneladas corresponden a carbones coquizables y las 557.769 toneladas restantes a carbones de uso térmico. Este volumen de carbón es producido por un total de 357 frentes de laboreo minero que, como puede verse, corresponde a una minería de tipo artesanal y tan sólo una pequeña cantidad de las minas del área pueden considerarse como pequeña y mediana minería.

La mayoría de las minas del área poseen baterías de hornos de coquización del tipo colmena, en los que procesan parte de los carbones producidos. La calidad del coque está sujeta, no sólo a las características que tengan los carbones producidos, pues no se les hace ningún tratamiento previo, sino también al influjo de los cambios ambientales, todo lo cual contribuye a disminuir la calidad del coque. El carbón que no se coquizo, es vendido en su mayoría a las termoeléctricas, que compran el 27.3% del total y a las industrias, que compran el 20.3%

3. MUESTREO

En este capítulo se describe el método de trabajo y algunas características de los carbones que se deben tener en cuenta durante el proceso de muestreo.

3.1. METODO DE TRABAJO

En el muestreo, efectuado durante febrero-marzo de 1983, se recolectaron 83 muestras, de aproximadamente 30 kg cada una, en 32 minas localizadas en los municipios de Cucunubá, Lenguaque y Guachetá (Cundinamarca).

Para la toma de muestras, primero se seleccionaron las minas que presentaran frentes mineros activos, prefiriendo para ello las galerías de desarrollo que se estaban avanzando en la época de muestreo. En ocasiones no fue posible encontrar tales frentes por lo que se tomó la muestra en explotaciones mineras en las cuales no se trabaja, siempre y cuando la interrupción de laboreo no fuera mayor a tres meses.

Preferentemente se trabajó en las minas que presentaban desarrollos de vías que cortaban varios mantos de carbón, con el fin de poder tener un mayor conocimiento de la secuencia litológica.

Una vez seleccionado el frente o lugar de muestreo, se procedió a limpiar el manto eliminando el carbón más superficial. Este arranque fué más profundo en aquellos frentes en los que no estaba activa la explotación. Para que la muestra fuera representativa de todo el manto de carbón, estas fueron tomadas siguiendo el sistema de canal, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

Con el fin de minimizar en lo posible la zona oxidada, se eliminó el carbón más superficial profundizando 0.20 a 0.50 m y hasta 2 m, en los casos de frentes no activos. Posteriormente se procedió a limpiar el piso, retirando todos los fragmentos de carbón y estériles allí presentes; luego se extendió un

plástico con el fin de aislar la muestra de la humedad del piso y de la contaminación de las partículas existentes en la vía de la mina. Se colectó la muestra de un canal de aproximadamente 0.30 m de ancho por 0.20 m de profundidad, abierto de manera uniforme y perpendicular a la estratificación, partiendo del techo a la base del manto. En general este canal bastó para tomar los 25 ó 30 kilos deseados; cuando el manto era muy delgado se profundizó unos centímetros más; y cuando el espesor del manto era muy potente se tomaron dos muestras de 30 kg cada una, mezclándose posteriormente y seleccionando mediante un cuarteo la cantidad requerida. Hay que dejar establecido, que en el presente muestreo no se mezcló el carbón con impurezas de minerales provenientes de las rocas que suprayacen e infrayacen al manto. Los estériles, nódulos y rocas interestratificadas con el carbón, que tenían más de 0.15 m de espesor y que pudieron diferenciarse fácilmente del carbón, tampoco fueron incluidos en las muestras colectadas; en este caso los intervalos con carbón fueron muestreados a partir de canales separados, mezclándose luego las muestras obtenidas, haciendo de esta manera que el manto estuviese homogéneamente representado. Las muestras obtenidas fueron empacadas en bolsas de polietileno selladas en el mismo frente, para evitar pérdidas de humedad.

La labor de la toma de las muestras fue complementada en lo posible con una descripción macroscópica, más o menos detallada, de las características litológicas y sedimentarias de las rocas.

La identificación de la muestra incluye el nombre de la mina, municipio al cual pertenece el nombre del manto y su posible correlación con las minas adyacentes, lugar de la mina en que se tomó la muestra, es decir si se trataba de un frente de desarrollo, de explotación o bien una vía de transporte; también se tuvo en cuenta si los frentes eran activos o no.

En minas con cruzadas que cortaban más de un manto, se hizo una columna estratigráfica generaliza que sirvió de base para un

intento de correlación de los mantos. Las características estructurales tales como fallas fueron tenidas en cuenta.

Las muestras colectadas fueron marcadas con un número de campo. Por último, se procedió a ubicar en los mapas geológicos (Anexos 1, 2 y 3) a escala 1:25.000, las minas muestreadas y los números de las muestras correspondientes. También se ubicaron en las columnas estratigráficas generalizadas para cada bloque, los números de las muestras correspondientes a cada manto. (Ver columnas estratigráficas, Anexos 5, 6 y 7).

3.2. ESTADO DE LAS MUESTRAS

En el Anexo 8 se presenta el número de campo y su correspondencia con el número de identificación de INGEOMINAS, la ubicación geográfica y estratigráfica de la muestra colectada, el nombre de la mina, las coordenadas de la boca mina y el municipio al cual pertenece, el nombre del manto muestreado, que no necesariamente corresponde al nombre utilizado en otras minas, lo cual hace que en ocasiones sea muy difícil la correlación, porque no pertenece en algunos casos a un sólo manto un determinado nombre, o bien porque se emplea regionalmente un mismo nombre para designar diferentes mantos.

Se incluye la posición estratigráfica del manto, de acuerdo a los bloques y niveles descritos en el capítulo anterior. También se anota el espesor del manto en el lugar en el cual se tomó la muestra.

En la última columna se hacen las observaciones generales de los factores que rodean al lugar en que se tomó la muestra y que posiblemente puedan tener alguna influencia en el grado de meteorización del carbón muestreado.

Hay que advertir, que en general las muestras colectadas, no obstante haber sido tomadas en frentes bajo tierra, debido a lo incipiente de la minería de la región estudiada, se hallan relativamente cerca a la superficie topográfica, pues por lo general, los tra-

bajos de explotación se hacen en minas poco profundas; por lo tanto en lugares en que la meteorización es muy intensa, se puede suponer que la oxidación haya afectado a algunas de las muestras tomadas.

En circunstancias normales de alteración, se supone que las muestras tomadas en frentes de laboreo de minas abandonadas, presentan un grado más alto de meteorización. Lo mismo sucede con aquellas muestras que se colectaron cerca de fallas o áreas muy fracturadas.

Las muestras colectadas corresponden en general a carbones frescos, y los valores anómalos presentados en los resultados de los análisis químicos, corresponden a factores locales que alteran puntualmente los carbones muestreados.

4. PREPARACION Y METODOS DE ANALISIS

Se presenta en este capítulo una descripción del esquema seguido para la preparación de las muestras y en forma resumida los métodos de los análisis realizados.

4.1. ESQUEMA DE PREPARACION

Para este estudio se ha diseñado un esquema particular de preparación con el fin de adaptarlo a las diferentes granulometrías exigidas en los diversos análisis, conservando lógicamente la representatividad de cada porción proveniente de la muestra original. Los principios fundamentales de la división y reducción de tamaño de la muestra son los normalizados por la ASTM en el "Método estándar de preparación de muestras de carbón para análisis" (Norma D 2013-72); el esquema resultante es más complejo pero mejor adaptado para la caracterización general del carbón.

La Figura 4 resume la metodología utilizada en la preparación de las muestras; dada la importancia que tiene esta etapa en los resultados obtenidos y que difiere de la esquematizada en la norma, merece ser

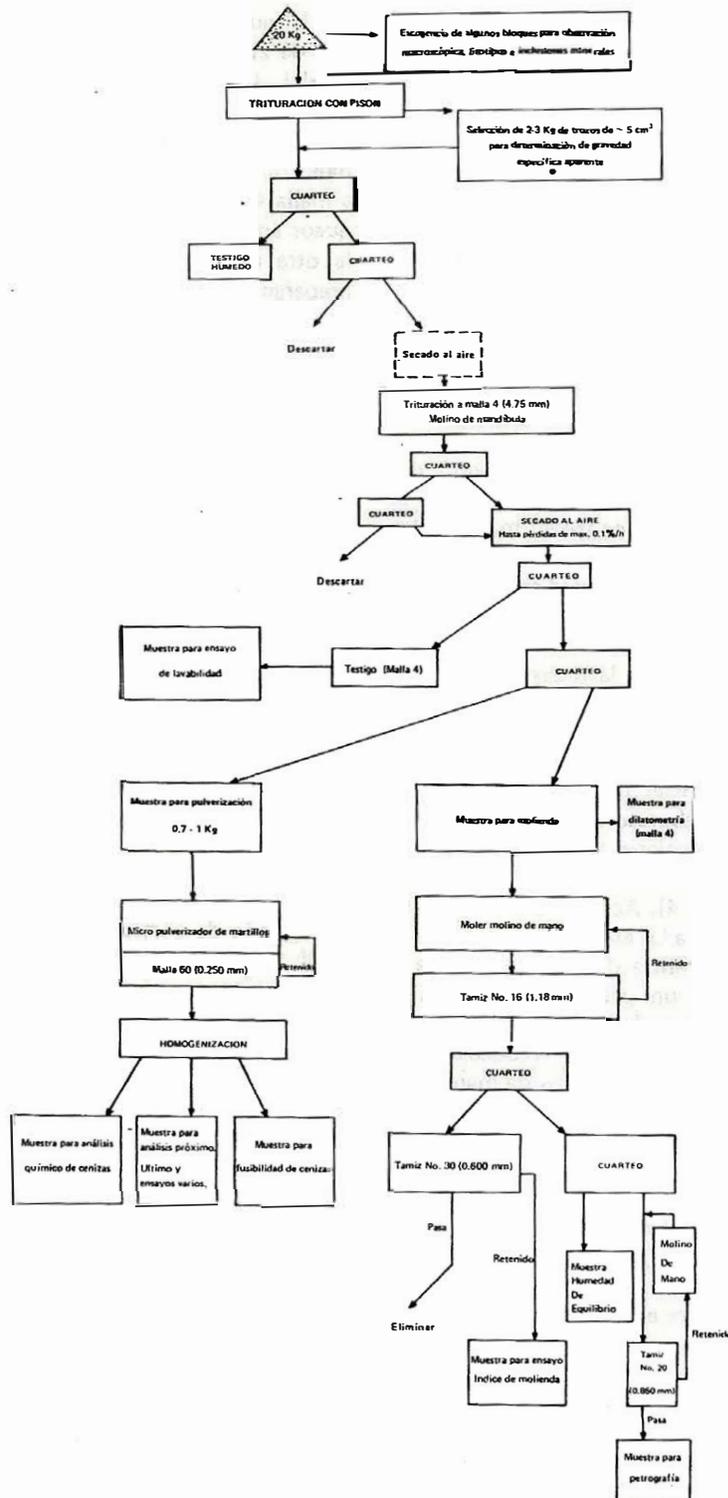


FIG. 4: Diagrama para preparación de muestras zona Checuá - Lenguazaque.

discutida en detalle. Es lógico que un muestreo inadecuado o una preparación deficiente viciarían los datos de un estudio por exactos y óptimos que fuesen.

La cantidad aproximada de muestra inicial es de 25 kg de los cuales se escogen algunos trozos que muestran claramente la alternancia de capas, con el fin de contar con muestra para un estudio posterior de litotipos, inclusiones minerales, etc., observaciones de tipo macroscópico que pueden complementar el estudio petrográfico posterior.

La muestra es sometida luego a una primera trituración con pisón, con el fin de disminuir de tamaño los trozos más grandes, adecuando la muestra en granulometría para la determinación de gravedad específica aparente y para facilitar el posterior cuarteo.

La división de la muestra se efectúa en cuarteadores, de tamaño adecuado al de la muestra que separa en dos porciones de igual peso aproximadamente. De un primer cuarteo se obtiene el testigo de la muestra tal como llega al laboratorio, para chequeos o nuevas determinaciones que requieren granulometrías mayores a la del testigo normal, 4.75 mm (malla 4). Aproximadamente 5 kg de carbón pasan a las etapas posteriores. Si la muestra se encuentra demasiado húmeda es necesario hacer un primer secado al aire, pues de lo contrario podría dificultar la trituración. Esta primera reducción de tamaño se efectúa en molinos de mandíbula previamente fijada la abertura de salida para obtener aproximadamente una dimensión de partícula de 4.75 mm.

Esta muestra a malla 4 es sometida a un secado al aire, controlado, en una estufa diseñada para tal efecto. Se entiende por secado al aire el proceso de secado parcial para equilibrar la humedad del carbón con la existente en la sala de preparación y que no ocurran cambios sustanciales de la humedad en los procesos de reducción y división. Para tal efecto se mantiene una circulación de aire 10 a 15°C por encima de la temperatura ambiente y máximo a 40°C, so-

bre la muestra esparcida en una capa de menos de 25 mm (dos veces el tamaño de partícula). La pérdida en peso sufrida por las muestras es controlada cada hora hasta que ésta no sea mayor de 0.1%. La mitad de la muestra así obtenida constituye el testigo a malla 4, testigo al cual se recurre para chequeos analíticos, ensayo de lavabilidad, etc., la otra mitad continúa con el proceso de preparación. Para efectuar los análisis químicos (próximo, último, de cenizas, etc.) se necesita un tamaño de partícula inferior a 0.250 mm, para lo cual parte de la muestra a malla 4 se pasa por un micropulverizador de martillos, se tamiza, empaca y homogeneiza antes de pasar al laboratorio. La otra parte de muestra requiere una reducción más gradual, pues los ensayos fisicoquímicos a efectuar, requieren granulometrías precisas y diferentes según el ensayo.

Para el ensayo dilatométrico la muestra se empaca a malla 4 y sólo cuando se va efectuar el ensayo se reduce a malla 100; esto es necesario pues como es sabido las propiedades plásticas son muy sensibles a la oxidación y, a tamaño de partículas muy pequeña ésta se acelera.

Los ensayos de índice de molienda Hardgrove y humedad de equilibrio, requieren tamaño de partículas menor a 1.18 mm (malla 16) y en petrografía del carbón se aconseja un tamaño de aproximadamente 0.85 mm; puesto que para estos análisis no es tolerable una alta producción de finos ya que éstos invalidan el ensayo, se diseñó una reducción muy gradual con un molino de mano, tamizado y circulación del retenido lo cual asegura las condiciones requeridas.

4.2. METODOS DE ANALISIS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

Una descripción detallada de los métodos utilizados en los diferentes análisis de las muestras de carbón rebasa los objetivos del presente trabajo; nos limitamos a mostrar en la Tabla 3 el tipo de análisis efectuado y en la Tabla 4 un resumen de los métodos y normas utilizados. En el caso del análisis elemental, un estudio detallado de los métodos,

TAB. 3: Tipos de análisis realizados a los carbones de la Zona Checua - Lenaguzaque.

TIPO DE ANALISIS	DETERMINACION	DEDUCIDO
ANALISIS PROXIMO	<ul style="list-style-type: none"> - Humedad residual - Cenizas - Materias volátiles 	Carbono fijo
ANALISIS VARIOS	<ul style="list-style-type: none"> - Carbono - Hidrógeno - Nitrógeno - Azufre 	Oxígeno
ANALISIS VARIOS	<ul style="list-style-type: none"> - Gravedad específica aparente - Poder calorífico - Formas de azufre: <ul style="list-style-type: none"> - Pirítico - Sulfato - Humedad de equilibrio - Índice de molienda 	S. Orgánico
ANALISIS DE CENIZAS	Fusibilidad de cenizas Atmósfera oxidante Atmósfera reductora Composición de las cenizas: SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 CaO MgO Na_2O K_2O TiO_2 P_2O_5 SO_3	<ul style="list-style-type: none"> - Índice de deposición - Índice de encostramiento
PROPIEDADES PLASTICAS	Índice de hinchamiento Dilatometría	Factor G Rango plástico
PETROGRAFIA	Poder reflector de la vitrinita: Máximo (PRV). Rmax Usual (PRU), Rr Análisis de grupos macerales vitrinita, exinita, inertinita.	

TAB. 4: Métodos y normas empleados para el análisis químico de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

DETERMINACION	METODO	NORMA
Preparación	Reducción a las diferentes granulometrías según los análisis a efectuar	ASTM D2013 - 72 Modificado
Gravedad Específica Aparente	Determinación por desplazamiento de un volumen de agua.	--
Humedad Residual	Método Indirecto	ASTM D3302 ASTM D3173
Cenizas	Calcinación a 750°C	ASTM D3174 - 73
Materia Volátil	Calentamiento controlado a 950°C	ASTM D3175
Poder Calorífico	Adiabático Isotérmico	ASTM D2015 - 77 ASTM D3287 - 77
Azufre Total	Instrumental (Detección infrarroja)	--
Carbono - Hidrógeno	Método de Liebig	ASTM D3778 - 73
Nitrógeno	Método Kjeldahl - Semimicro	ISO 333 (1975)
Índice de Hinchamiento	Calentamiento rápido controlado	ASTM D720 - 67
Dilatometría	Ensayo Audibert - Arnu	ISO 349 - 1975
Fusibilidad de Cenizas	Ensayos en atmósfera oxidante y reductora	ASTM D1857 - 6E
Humedad de Equilibrio	Equilibrar la muestra en una atmósfera del 97% de humedad relativa	ASTM D1412 - 74
Índice de Molienda	Determinar la facilidad de pulverización en un molino y condiciones estandarizadas	ASTM D409 - 71

su aplicación y usos, se encuentra en el informe "Análisis último elemental del Carbón" de PEREZ, URIBE, VALDERRAMA, 1982.

Cabe sin embargo hacer algunas aclaraciones respecto a los métodos de gravedad específica y azufre utilizados, considerando que no se encuentran normalizados.

Por varios años el método empleado en el Laboratorio Químico para la determinación de azufre fue el de lavado de la bomba calorimétrica (ASTM D 3177, Método B); posteriormente se adoptó el ensayo Eschka (ISO 334 y ASTM D 3137 Método A). Estos dos métodos son los más comúnmente empleados; poseen una buena precisión, pero son muy laboriosos y consecuentemente demorados.

Actualmente el Laboratorio Químico de Ingeominas utiliza un Método Instrumental para cuantificar el azufre. El principio del método consiste en volatilizar todo el azufre, efectuando la combustión de la muestra a alta temperatura (1300°C) en atmósfera de oxígeno, determinando luego el azufre por medio de un detector infrarrojo.

Los estudios comparativos previos de este método con los normalizados dieron excelentes resultados.

Como un complemento para los estudios de lavabilidad se decidió efectuar los análisis de formas de azufre para aquellas muestras que tuvieran contenidos relativamente altos de cenizas y azufre. El método utilizado está descrito en la Norma ASTM D 2492-77

El azufre en forma de sulfato se obtiene efectuando su extracción con ácido clorhídrico, precipitando con cloruro de bario y posterior determinación gravimétrica.

El azufre pirítico es cuantificado por extracción con ácido nítrico y determinación del hierro en solución por absorción atómica. La diferencia entre el azufre total y la suma del azufre pirítico y sulfato, da la cantidad de azufre orgánico en la muestra.

El método utilizado para determinar la gravedad específica aparente es una modificación del empleado en los laboratorios de Baytown de la Exxon. Consiste en determinar el peso del agua desalojada al sumergir un peso conocido de carbón de una granulometría menor de 50 mm y mayor de 6.3 mm.

En las Normas ASTM no figura explícitamente un procedimiento para la determinación de gravedad específica verdadera en carbones, pero sí existe para el coque. Este método ASTM D 167-73, se empleó para los carbones finamente pulverizados (< malla 250 μm) y coincide con el utilizado por el Bureau of Mines para carbones y coques (BUREAU OF MINES, 1967).

5. RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS

Para una mayor facilidad en la consulta de los datos, se agrupan todos los resultados del análisis químico en un sólo capítulo aunque la discusión de éstos se efectúa por grupos de análisis en el capítulo siguiente. De las tablas de datos se excluyen los resultados de fusibilidad y análisis de las cenizas puesto que se dedica el capítulo 8 a estas determinaciones.

5.1. DATOS

Las tablas que resumen los resultados del análisis se presentan agrupados de acuerdo a su ubicación por bloques y niveles. Tal agrupación se adapta mucho mejor a una discusión de resultados y a dar una visión más clara en cuanto a presentación geográfica y utilización local, que la simple enumeración con base en un código de identificación. Ver tablas 5, 6 y 7.

5.2. CONVERSION DE RESULTADOS A OTRAS BASES

Como es bien sabido no todos los resultados analíticos son utilizables como tales, es decir en base como se analiza (o sea seca al aire); es necesario transformar los datos a la base más adecuada para su correcto

TAB. 5: Resultados del análisis Químico de Carbones de la Zona Checua - Lenguazaque. En base seca al aire (como se analizó). BLOQUE I

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS No.	Gravedad Especif. Aparente	Gravedad Especif. Verdad.	Humed. de equil. %Peso	Humed. Residual %Peso	Cenizas %Peso	Materia Volátil %Peso	Carbono Fijo %Peso	Poder Calorífico cal/gr.	Azufre Total %como S	Carbono %Peso	Hidrógeno %Peso	Nitrógeno %Peso	Oxígeno %Peso	Ind. de Moñen. IHG
BLOQUE I NIVEL TKg 2															
151354	1	1.31	1.34	1.4	1.0	5.3	16.3	77.4	8183	0.51	85.04	4.65	1.69	2.81	104
151355	2	1.23	1.36	1.7	0.8	9.3	15.4	74.5	7779	0.49	80.04	4.36	1.59	4.22	104
151356	3	1.32	1.25	1.6	1.0	4.3	16.0	78.7	8219	0.46	84.82	4.46	1.56	4.40	121
151413	60	1.36	1.29	1.4	0.7	4.3	17.3	77.7	8174	0.44	85.51	4.69	1.72	3.34	157
151414	61	1.28	1.31	1.5	1.0	4.3	19.0	75.7	8234	0.44	84.98	4.62	1.82	3.84	123
151415	62	1.27	1.28	1.1	0.7	4.6	20.4	74.3	8242	0.57	85.47	5.04	1.90	2.42	104
151416	63	1.30	1.29	1.4	0.6	4.2	18.6	76.6	8282	0.48	84.19	4.83	1.81	4.49	104
151417	64	1.33	1.31	1.0	0.4	7.2	19.5	72.9	8048	0.74	82.60	5.11	1.82	2.53	103
151418	65	1.25	1.27	1.0	0.4	4.7	23.2	71.7	8249	1.09	84.87	5.03	1.93	2.38	111
151419	66	1.37	1.45	1.7	0.8	25.6	18.9	54.7	6243	0.86	64.48	4.18	1.29	3.59	87
151420	67	1.31	1.28	1.1	0.6	6.1	21.2	72.1	8100	0.48	83.69	4.87	1.80	3.06	90
151421	68	1.35	1.34	1.5	0.7	9.5	19.6	70.2	7763	0.49	80.52	4.89	1.73	2.87	95
151422	69	1.36	1.32	1.7	0.8	11.9	18.2	69.1	7552	0.46	77.40	4.46	1.72	4.06	104
151426	73	1.30	1.28	0.9	0.4	5.8	20.2	73.6	8126	0.62	81.23	4.97	1.76	5.62	97
151427	74	1.29	1.30	1.0	0.5	9.1	20.3	70.1	7742	0.76	80.52	4.62	1.62	3.38	95
151428	75	1.40	1.45	1.5	0.5	23.8	17.8	57.9	6381	0.64	66.72	4.15	1.55	3.14	96
151429	76	1.29	1.29	1.1	0.3	8.6	19.8	71.3	7883	0.78	81.30	5.00	1.53	2.79	94
151430	77	1.40	1.43	1.7	0.9	26.1	16.4	56.6	6246	0.46	64.59	4.00	1.41	3.44	89
151431	78	1.29	1.26	1.0	0.4	5.7	23.2	70.7	8210	0.72	83.46	4.91	1.81	3.40	108
151432	79	1.31	1.37	0.9	0.4	14.6	21.3	63.7	7356	0.68	75.00	4.78	1.59	3.35	94
BLOQUE I NIVEL TKg 3															
151367	14	1.35	1.34	1.3	0.9	10.7	26.3	62.1	7582	1.64	76.64	5.06	1.72	4.24	86
151368	15	1.36	1.38	1.0	1.0	15.2	25.7	58.1	7078	1.52	72.76	4.69	1.54	4.29	73
151369	16	1.36	1.31	1.2	1.1	7.0	25.8	66.1	7940	0.76	81.04	4.63	1.63	4.94	88
151370	17	1.31	1.39	1.0	0.8	15.0	25.6	58.6	7191	2.08	73.04	4.86	1.54	3.48	80
151371	18	1.29	1.31	1.1	1.1	8.0	26.8	64.1	7848	1.71	79.77	4.78	1.71	4.03	88
151372	19	1.43	1.40	1.1	0.7	16.5	26.3	56.5	7107	2.13	70.89	4.62	1.59	4.27	82
151381	28	1.28	1.32	1.0	1.1	7.3	26.0	65.6	7878	0.86	80.24	5.56	1.78	4.26	96
151382	29	1.38	1.40	1.2	0.8	16.5	24.9	57.8	7029	1.17	70.69	4.71	1.56	5.37	84
151383	30	1.33	1.31	1.0	0.5	5.6	24.6	69.3	8095	0.91	83.08	4.62	1.73	4.06	90
151384	31	1.50	1.37	1.1	0.4	15.4	18.2	66.0	7228	0.78	75.28	4.32	1.50	2.72	101

TAB. 6: Resultados del análisis Químico de Carbones de la Zona Checua - Lenguaque. Base seca al aire (como se analizó). BLOQUE II

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS No.	Gravedad Especif. Aparente	Gravedad Especif. Verdad.	Humed. de equil. %Peso	Humed. Residual %Peso	Cenizas %Peso	Materia Volátil %Peso	Carbono Fijo %Peso	Poder Calorífico Cal/gr.	Azufre Total %como S	Carbono %Peso	Hidrógeno %Peso	Nitrógeno %Peso	Oxígeno %Peso	Ind. de Molien. IHG
BLOQUE II NIVEL TKg2															
151373	20	1.28	1.31	1.3	1.0	6.8	28.4	63.8	7909	0.56	80.43	4.86	1.63	5.22	74
151375	22	1.28	1.30	1.2	0.7	8.0	28.8	62.5	7889	0.62	80.20	5.11	1.68	4.39	75
151376	23	1.24	1.30	1.4	0.7	7.3	28.6	63.4	7940	0.58	80.20	4.96	1.79	5.11	93
151378	25	1.32	1.29	1.0	0.5	8.3 ^a	26.5	64.7	7879	0.50	80.44	4.93	1.66	4.17	80
151379	26	1.43	1.38	1.4	0.8	14.5	25.8	58.9	7079	1.18	72.16	4.42	1.51	6.23	83
151380	27	1.34	1.33	1.4	1.0	8.4	24.1	66.5	7783	0.64	78.92	4.88	1.57	5.59	81
151385	32	1.32	1.32	1.5	0.7	5.8	18.9	74.6	8048	0.49	83.61	4.90	1.57	3.63	97
151386	33	1.25	1.33	1.5	1.2	4.2	18.0	76.6	8167	0.46	85.80	4.27	1.57	3.70	129
151387	34	1.29	1.32	1.1	0.3	10.4	19.5	69.8	7687	0.62	79.90	4.62	1.56	2.90	95
151388	35	1.35	1.30	1.0	0.4	6.5	19.9	73.2	8076	0.55	84.32	4.38	1.52	2.73	92
151389	36	1.34	1.31	1.0	0.6	7.7	19.8	71.9	7932	0.56	82.47	4.56	1.61	3.10	91
151392	39	1.33	1.32	1.4	1.0	11.7	30.9	56.4	7456	1.08	76.11	4.64	1.74	4.73	78
151404	51	1.32	1.30	1.5	0.6	5.8	26.3	67.3	8055	0.68	81.90	5.23	1.72	4.67	85
151405	52	1.24	1.28	1.6	0.5	4.3	27.1	68.1	8050	0.58	83.51	5.34	1.91	4.36	91
151406	53	1.22	1.29	1.5	0.7	4.9	26.6	67.8	8123	0.61	82.19	5.27	1.97	5.06	83
151407	54	1.39	1.33	1.5	0.51	1.9	25.9	61.7	7517	0.52	76.82	4.96	1.78	4.05	90
BLOQUE II NIVEL TKg3															
BLOQUE II NIVEL TKg3															
151363	10	1.28	1.33	1.5	1.1	9.8	29.1	60.0	7582	0.84	77.30	5.44	1.73	4.89	74
151377	24	1.35	1.31	1.6	0.7	9.3	26.5	63.5	7726	0.81	78.80	5.36	1.65	4.08	77
151390	37	1.30	1.30	1.2	0.8	5.8	30.3	63.1	7932	0.82	81.34	4.80	1.68	5.56	66
151393	40	1.23	1.30	1.2	0.9	6.1	37.7	55.3	7832	1.24	78.66	5.26	1.71	7.03	50
151391	38	1.30	1.31	1.2	0.8	7.7	32.0	59.5	7796	0.64	79.24	5.30	1.52	5.60	58
151403	50	1.34	1.31	1.6	0.8	9.3	31.1	58.8	7670	1.02	76.84	5.10	1.91	5.83	67

TAB. 7: Resultados del análisis Químico de Carbones de la Zona Checua - Lenguazaque. Base seca al aire (como se analizó). BLOQUES III y V

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS No.	Gravedad Especif. Aparente	Gravedad Especif. Verdad.	Humed. de equil. %Peso	Humed. Residual %Peso	Cenizas %Peso	Materia Volátil %Peso	Carbono Fijo %Peso	Poder Calorífico Cal/gr.	Azufre Total %como S	Carbono %Peso	Hidrógeno %Peso	Nitrógeno %Peso	Oxígeno %Peso	Ind. de Molien. IHG
BLOQUE III NIVEL TKg2															
151362	9	1.41	1.35	2.3	2.3	11.0	28.8	57.9	7199	1.32	73.42	5.16	1.47	7.63	55
151366	13	1.31	1.32	1.6	1.1	10.6	31.0	57.3	7499	1.12	74.76	5.38	1.74	6.40	63
151423	70	1.26	1.35	2.0	0.8	15.0	25.8	58.4	7142	0.48	73.43	4.59	1.69	4.81	72
151424	71	1.31	1.32	2.0	1.0	10.4	25.4	63.2	2532	0.50	76.27	5.18	1.72	5.93	74
151425	72	1.30	1.29	1.9	1.0	5.3	26.1	67.6	8024	0.53	81.48	5.16	1.72	5.81	75
BLOQUE III NIVEL TKg3															
151357	4	1.31	1.31	1.9	1.3	9.2	34.3	55.2	7444	2.04	74.35	5.52	1.78	7.11	51
151358	5	1.36	1.41	2.3	2.0	16.8	32.0	49.2	6587	1.74	67.00	5.29	1.57	7.60	47
151359	6	1.23	1.33	2.1	1.6	11.9	33.9	52.6	7224	1.42	72.98	5.25	1.62	6.83	52
151360	7	1.33	1.31	0.9	0.9	9.5	31.1	58.5	7646	0.56	77.08	5.27	1.74	5.85	64
151361	8	1.28	1.30	1.9	1.3	5.5	33.3	59.9	7919	1.15	79.44	5.44	1.72	6.75	62
151364	11	1.30	1.31	2.0	1.7	6.7	27.9	63.7	7827	0.53	79.44	5.32	1.71	6.30	75
151365	12	1.27	1.30	1.8	1.1	6.4	29.9	62.6	7872	0.62	79.18	5.22	1.76	6.82	74
BLOQUE V NIVEL TKg2															
151394	41	1.26	1.29	1.1	0.6	4.7	23.3	71.4	8192	0.61	84.46	4.57	1.87	3.79	86
151395	42	1.28	1.26	1.6	0.9	4.4	17.9	76.8	8199	0.46	86.19	4.54	1.57	2.84	104
151396	43	1.32	1.31	1.0	0.4	5.5	19.2	74.9	8151	0.54	84.06	4.20	1.84	3.88	104
151397	44	1.26	1.30	1.2	0.5	4.2	20.6	74.7	8265	0.62	86.28	4.22	1.70	2.98	104
151398	45	1.31	1.30	1.2	0.4	4.4	21.0	74.2	8257	0.62	85.95	4.41	1.80	2.82	109
151399	46	1.33	1.28	0.9	0.5	4.6	20.2	74.7	8281	0.58	85.56	4.61	1.88	2.77	107
151400	47	1.26	1.29	0.9	0.4	4.1	20.4	75.1	8308	0.64	85.69	4.68	1.68	3.21	109
151401	48	1.23	1.29	0.9	0.5	6.2	22.4	70.9	8142	1.10	83.61	4.66	1.91	2.52	116
151402	49	1.33	1.38	0.8	0.6	13.1	17.5	68.8	7408	0.56	77.12	4.12	1.66	3.44	108
151408	55	1.31	1.33	1.1	0.5	6.9	21.1	71.5	8052	0.58	82.54	4.50	1.90	3.58	94
151433	80	1.44	1.37	2.2	1.0	9.9	17.6	71.5	7612	0.48	79.29	4.64	1.60	4.09	107
151434	81	1.29	1.30	1.2	0.5	3.5	18.7	77.3	8354	0.51	86.34	5.06	1.82	2.77	100
151435	82	1.30	1.33	1.2	0.3	5.8	18.0	75.9	8159	0.63	84.23	4.84	1.75	2.75	99
151436	83	1.31	1.29	1.4	0.6	4.6	19.0	75.8	82.13	0.52	84.95	4.64	1.82	3.47	109
BLOQUE V NIVEL TKg3															
151409	56	1.30	1.40	0.9	0.5	17.5	22.8	59.2	7026	2.34	7026	4.56	1.64	3.70	96
151410	57	1.32	1.31	1.8	0.7	7.9	24.1	67.3	7893	2.38	80.60	5.19	1.90	2.03	91
151411	58	1.33	1.35	1.5	0.7	14.0	22.5	62.8	73.04	1.62	74.24	5.16	1.81	3.17	88
151412	59	1.31	1.34	1.4	0.5	11.8	24.6	63.1	7496	1.12	75.94	5.01	1.81	4.32	84

manejo, interpretación o utilización. En las tablas se presentan los datos expresados en las bases empleadas en los análisis de los carbones.

La Tabla 8 muestra las fórmulas utilizadas para la conversión de los valores, de base seca al aire (como se analizó) a las otras bases. Las tablas 9 a 18 presentan los resultados químicos en las diferentes bases.

TAB. 8: Fórmulas para conversión de los valores de base como se analizó a las otras bases.

1 - Base Seca (BS)

$$X_{bs} = \frac{X_{csa} \cdot 100}{100 - HR}$$

Para el Hidrógeno y Oxígeno se utilizan las siguientes fórmulas:

$$H_{bs} = (H_{csa} - 0,1119 \cdot HR) \cdot \frac{100}{100 - HR}$$

$$O_{bs} = 100 - (C_{zbs} + C_{bs} + H_{bs} + N_{bs} + S_{bs} + Cl_{bs})$$

2 - Base Seca Libre de Cenizas (S.L.cz)

$$X_{slcz} = X_{csa} \cdot \frac{100}{100 - (HR + CZ)}$$

3 - Base Seca Libre de Materia Mineral

$$X_{slmm} = \frac{X_{csa} \cdot 100}{100 - (HR + 1,08 \cdot cz + 0,55 \cdot S)}$$

$$CF_{slmm} = \frac{(CF_{csa} - 0,15 S) \cdot 100}{100 - (HR + 1,08 \cdot CZ + 0,55 \cdot S)}$$

$$MV_{slmm} = 100 - CF_{SLMM}$$

4 - Base Humedad (Humedad de equilibrio)

$$X_{bh} = X_{csa} \cdot \frac{(100 - HE)}{(100 - HR)}$$

5 - Base Humedad Libre de Cenizas

$$H_{hlcz} = \frac{X_{csa} \cdot \frac{100 - HE}{100 - HR} \cdot 100}{100 - CZ}$$

6 - Base Humedad Libre de Materia Mineral

$$X_{hlmm} = X_{csa} \cdot \frac{100 - HE}{100 - HR} \cdot 100$$

$$100 - (1,08 \cdot CZ + 0,55 \cdot S) \left(\frac{100 - HE}{100 - HR} \right)$$

$$P_{Chlmm} = (PC_{csa} - 27,78 \cdot S_{csa}) \left(\frac{100 - HE}{100 - HR} \right)$$

$$(cal/gr) \quad 100 - (1,08 \cdot cz + 0,55 \cdot S) \left(\frac{100 - HE}{100 - HR} \right)$$

Donde:

CSA	Base como se analizó
BS	= Base seca
SLcz	= Base seca libre de cenizas
slmn	= Base seca libre de materia mineral
bh	Base húmeda
hlcz	= Base húmeda libre de cenizas
hlmn	= Base húmeda libre de materia mineral
HR	% Humedad residual
HE	= % Humedad de equilibrio
CZ	= % de Cenizas
H	= % de Hidrógeno
O	= % de Oxígeno
C	= % de Carbono
N	= % de Nitrógeno
S	= % de Azufre total
Cl	= % de Cloro
MV	= % de Material Volátil
CF	= % de Carbono Fijo
PC	= % Poder Calorífico Bruto (cal/gr.)
X	Parámetro

5.3. ENSAYOS PLASTICOS

Los resultados del ensayo dilatométrico y del índice de hinchamiento libre se han agrupado en las tablas 19, 20 y 21. Dado que los llamados ensayos plásticos juegan un papel primordial en los carbones coquizables, se enfatiza sobre estas determinaciones agrupándolas en este numeral.

6. DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la metodología empleada en el tratamiento de la información obtenida de la zona, una discusión de cada parámetro y las relaciones de éstos entre sí.

6.1. METODOLOGÍA

Se realiza la discusión de las diferentes determinaciones en grupos de análisis conservando para este fin los comúnmente utilizados, es decir, análisis próximo, análisis último, ensayos varios y propiedades plásti-

TAB. 9: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lenguaque - expresados en base seca. BLOQUE I.

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %	Poder Calorífico Cal/g	Azufre Como S %	Cenizas %	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %
--------------------	------------------------	-------------------------	------------------------------	-----------------------	--------------	--------------	----------------	----------------

BLOQUE I NIVEL TKg2

151354	1	16.5	8266	0.52	5.4	85.90	4.58	1.71
151355	2	15.5	7842	0.49	9.4	80.69	4.30	1.60
151356	3	16.2	8302	0.46	4.3	85.68	4.39	1.58
151413	60	17.4	8232	0.44	4.3	86.11	4.64	1.73
151414	61	19.2	8317	0.44	4.3	85.84	4.55	1.84
151415	62	20.5	8300	0.57	4.6	86.07	5.00	1.91
151416	63	18.7	8332	0.48	4.2	84.70	4.79	1.82
151417	64	19.6	8080	0.74	7.2	82.93	5.09	1.83
151418	65	23.3	8282	1.09	4.7	85.21	5.01	1.94
151419	66	19.1	6293	0.87	25.8	65.00	4.12	1.30
151420	67	21.3	8149	0.48	6.1	84.20	4.83	1.81
151421	68	19.7	7818	0.49	9.6	81.09	4.85	1.74
151422	69	18.3	7613	0.46	12.0	78.02	4.41	1.73
151426	73	20.3	8159	0.62	5.8	81.56	4.95	1.77
151427	74	20.4	7781	0.76	9.1	80.92	4.59	1.63
151428	75	17.9	6413	0.64	23.9	67.06	4.11	1.56
151429	76	19.9	7907	0.78	8.6	81.54	4.98	1.53
151430	77	16.5	6303	0.46	26.3	65.18	3.93	1.42
151431	78	23.3	8243	0.72	5.7	83.80	4.88	1.82
151432	79	21.4	7386	0.68	14.7	75.30	4.75	1.60

BLOQUE I NIVEL TKg3

151367	14	26.5	7651	1.65	10.8	77.34	5.00	1.74
151368	15	26.0	7149	15.4	73.49	73.49	4.62	1.56
151369	16	26.1	8028	0.77	7.1	81.94	4.56	1.65
151370	17	25.8	7249	2.10	15.1	73.63	4.81	1.55
151371	18	27.1	7935	1.73	8.1	80.66	4.71	1.73
151372	19	26.5	7157	2.15	16.6	71.39	4.57	1.60
151371	28	26.3	7966	0.87	7.4	81.13	5.50	1.80
151382	29	25.1	7086	1.18	16.6	71.26	4.66	1.57
151383	30	24.7	8136	0.91	5.6	83.50	4.59	1.74
151384	31	18.3	7257	0.78	15.5	75.58	4.29	1.51

TAB. 10: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lengua-
 que expresados en base seca. BLOQUE II

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %	Poder Calorífico Cal/g	Azufre Como S %	Cenizas %	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %
BLOQUE II NIVEL TKg2								
151373	20	28.7	7965	0.67	6.9	81.29	5.06	1.64
151374	21	28.8	7973	0.56	7.4	81.08	4.81	1.64
151375	22	29.0	7945	0.65	8.1	80.77	5.07	1.69
151376	23	28.8	7996	0.58	7.4	80.83	4.92	1.80
151378	25	26.6	7919	0.50	8.3	80.84	4.90	1.67
151379	26	26.0	7136	1.19	14.6	72.74	4.37	1.52
151380	27	24.3	7862	0.65	8.5	79.72	4.82	1.59
151385	32	19.0	8105	0.49	5.8	84.20	4.86	1.58
151386	33	18.2	8266	0.47	4.3	86.84	4.19	1.59
151387	34	19.6	7710	0.62	10.4	80.14	4.60	1.56
151388	35	20.0	8108	0.55	6.5	84.66	4.35	1.53
151389	36	19.9	7980	0.56	7.7	82.92	4.52	1.62
151392	39	31.2	7531	1.09	11.8	76.88	4.57	1.76
151402	51	26.5	8104	0.68	5.8	82.39	5.19	1.73
151402	52	27.2	8090	0.58	4.3	83.93	5.31	1.92
151406	53	26.8	8180	0.61	4.9	82.77	5.23	1.98
151407	54	26.0	7555	0.52	12.0	77.21	4.93	1.79
BLOQUE II NIVEL TKg3								
151363	10	29.4	7666	0.85	9.9	78.16	5.38	1.75
151377	24	26.7	7780	0.82	9.4	79.36	5.32	1.66
151390	37	30.5	7996	0.83	5.8	82.00	4.75	1.69
151391	38	32.3	7859	0.65	7.8	79.88	8.25	1.53
151393	40	38.0	7903	1.25	6.2	79.37	5.21	1.73
151403	50	31.4	7732	1.03	9.4	77.46	5.05	1.93

TAB.11: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lengua-za que expresados en base seca. BLOQUES III y V

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %	Poder Calorífico Cal/g	Azufre Como S %	Cenizas %	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %
BLOQUE III NIVEL TKg2								
151362	9	29.5	7368	1.35	11.3	75.15	5.02	1.50
151366	13	31.3	7582	1.13	10.7	75.59	5.32	1.76
151423	70	26.0	7200	0.48	15.1	74.02	4.54	1.70
151424	71	25.7	7608	0.51	10.5	77.04	5.12	1.74
151425	72	26.4	8105	0.54	5.4	82.30	5.10	1.74
BLOQUE III NIVEL TKg3								
151367	4	34.8	7542	2.07	9.3	75.33	5.45	1.80
151358	5	32.7	6721	1.78	17.1	68.37	5.17	1.60
151359	6	34.5	7341	1.44	12.1	74.17	5.15	1.65
151360	7	31.4	7715	0.57	9.6	77.78	5.22	1.76
151361	8	33.7	8023	1.17	5.6	80.49	5.36	1.74
151364	11	28.4	7962	0.54	6.8	80.81	5.22	1.74
151365	12	30.2	7960	0.63	6.5	80.06	5.15	1.78
BLOQUE V NIVEL TKg2								
151394	41	23.4	8241	0.61	4.7	84.97	4.53	1.88
151395	42	18.1	8273	0.46	4.4	86.97	4.48	1.58
151396	43	19.3	8184	0.54	5.5	84.40	4.17	1.85
151397	44	20.7	8307	0.62	4.2	86.71	4.18	1.71
151398	45	21.1	8290	0.62	4.4	86.30	4.38	1.81
151399	46	20.3	8323	0.58	4.6	85.99	4.58	1.89
151400	47	20.5	8341	0.64	4.1	86.03	4.65	1.69
151401	48	22.5	8183	1.11	6.2	84.03	4.63	1.92
151402	49	17.6	7453	0.56	13.2	77.59	4.08	1.67
151408	55	21.2	8092	0.58	6.9	82.95	4.47	1.91
151433	80	17.7	7689	0.48	10.0	80.09	4.57	1.62
151434	81	18.8	8396	0.51	3.5	86.77	5.03	1.83
151435	82	18.1	8184	0.63	5.8	84.48	4.82	1.76
151436	83	19.1	8263	0.52	4.6	85.46	4.60	1.83
BLOQUE V NIVEL TKg3								
151409	56	22.9	7061	2.35	17.6	70.61	4.53	1.65
151410	57	24.3	7949	2.40	8.0	81.17	5.15	1.91
151411	58	22.7	7355	1.63	14.1	74.76	5.12	1.82
151412	59	24.7	7534	1.13	11.9	76.32	4.98	1.82

TAB. 12: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lenguaque expresados en base seca libre de cenizas. BLOQUE I

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %Peso	Poder Calorífico Cal/g	Carbono % Peso	Hidrógeno % Peso	Nitrógeno % Peso.
BLOQUE I NIVEL TKg2						
151354	1	17.4	8733	90.76	4.84	1.80
151355	2	17.1	8653	89.03	4.75	1.77
151356	3	16.9	8679	89.57	4.59	1.65
151413	60	18.2	8604	90.01	4.85	1.81
151414	61	20.1	8695	89.74	4.76	1.92
151415	62	21.5	8703	90.25	5.24	2.01
151416	63	19.5	8700	88.43	5.00	1.90
151417	64	21.1	8710	89.39	5.48	1.97
151418	65	24.4	8692	89.43	5.25	2.03
151419	66	25.7	8482	87.61	5.56	1.75
151420	67	22.7	8682	89.70	5.15	1.93
151421	68	21.8	8645	89.67	5.36	1.93
151422	69	20.8	8651	88.66	5.01	1.97
151426	73	21.5	8663	86.60	5.25	1.88
151427	74	22.5	8564	89.07	5.05	1.79
151428	75	23.5	8429	88.14	5.41	2.05
151429	76	21.7	8653	89.24	5.45	1.68
151430	77	22.5	8556	88.48	5.34	1.93
151431	78	24.7	8743	88.88	5.18	1.93
151432	79	25.1	8654	88.24	5.57	1.87
BLOQUE I NIVEL TKg3						
151367	14	29.8	8577	86.70	5.61	1.95
151368	15	30.7	8646	86.83	5.46	1.84
151369	16	28.1	8640	88.18	4.90	1.77
151370	17	30.4	8540	86.75	5.67	1.83
151371	18	29.5	8634	87.76	5.12	1.88
151372	19	31.8	8583	85.62	5.49	1.92
151381	28	28.4	8600	87.60	5.94	1.94
151382	29	30.1	8499	85.48	5.59	1.89
151383	30	26.2	8621	88.48	4.86	1.84
151384	31	21.6	8584	89.41	5.08	1.78

TAB. 13: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lenguazaque expresados en base seca libre de cenizas. BLOQUE II

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %Peso	Poder Calorífico Cal/g	Carbono % Peso	Hidrógeno % Peso	Nitrógeno % Peso
BLOQUE II NIVEL TKg2						
151373	20	30.8	8552	87.29	5.43	1.76
151374	21	31.1	8606	87.52	5.19	1.77
151375	22	31.5	8641	87.84	5.51	1.84
151376	23	31.1	8630	87.24	5.31	1.95
151378	25	29.1	8639	88.20	5.34	1.82
151379	26	30.5	8358	85.19	5.11	1.78
151380	27	26.6	8591	87.11	5.26	1.73
151385	32	20.2	8607	89.42	5.16	1.68
151386	33	19.0	8633	90.70	4.37	1.66
151387	34	21.8	8608	89.47	5.14	1.75
151388	35	21.4	8675	90.57	4.66	1.63
151389	36	21.6	8650	89.88	4.90	1.76
151392	39	35.4	8541	87.18	5.19	1.99
151404	51	28.1	8606	87.50	5.52	1.84
151405	52	28.5	8456	87.72	5.55	2.01
151406	53	28.2	8605	87.07	5.50	2.09
151407	54	29.6	8581	87.69	5.60	2.03
BLOQUE II NIVEL TKg3						
151363	10	32.7	8510	86.76	5.97	1.94
151377	24	29.4	8584	87.56	5.87	1.83
151390	37	32.4	8493	87.09	5.04	1.80
151391	38	35.0	8520	86.60	5.69	1.66
151393	40	40.5	8422	84.58	5.55	1.84
151403	50	34.6	8532	85.47	5.57	2.12

TAB. 14: Resultados del análisis químico de carbones de la Zona Checua - Lenguaque expresados en base seca libre de cenizas. BLOQUE III y V

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Materia Volátil %Peso	Poder Calorífico Cal/g	Carbono % Peso	Hidrógeno % Peso	Nitrógeno % Peso
BLOQUE III NIVEL TKg2						
151362	9	33,2	8303	84,68	5,65	1,70
151366	13	35,1	8493	84,67	5,95	1,97
151423	70	30,6	8482	87,21	5,34	2,01
151424	71	28,7	8501	86,08	5,72	1,94
151425	72	27,9	8564	86,96	5,39	1,84
BLOQUE III NIVEL TKg3						
151357	4	38,3	8317	83,07	6,01	1,99
151358	5	39,4	8112	82,51	6,24	1,93
151359	6	39,2	8351	84,37	5,86	1,87
151360	7	34,7	8533	86,03	5,77	1,94
151361	8	35,7	8497	85,24	5,68	1,85
151364	11	30,5	8545	86,72	5,60	1,87
151365	12	32,3	8510	85,60	5,51	1,90
BLOQUE V NIVEL TKg2						
151394	41	24,6	8650	89,19	4,75	1,97
151395	42	18,9	8658	91,01	4,69	1,66
151396	43	20,4	8662	89,33	4,42	1,96
151397	44	21,6	8673	90,54	4,37	1,78
151398	45	22,1	8673	90,28	4,59	1,89
151399	46	21,3	8726	90,16	4,80	1,98
151400	47	21,4	8699	89,73	4,85	1,76
151401	48	24,0	8727	89,61	4,93	2,05
151402	49	20,3	8584	89,36	4,70	1,92
151408	55	22,8	8695	89,14	4,80	2,05
151433	80	19,6	8543	88,99	5,08	1,80
151434	81	19,5	8702	89,94	5,21	1,90
151435	82	19,2	8689	89,70	5,12	1,86
151436	83	20,0	8664	89,61	4,82	1,92
BLOQUE V NIVEL TKg3						
151409	56	74,2	8859	88,59	5,68	2,07
151410	57	26,4	8636	88,18	5,59	2,08
151411	58	26,4	8563	87,03	5,96	2,12
151412	59	28,1	8547	86,59	5,65	2,06

TAB. 15: Resultados del análisis de las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque expresados en base seca libre de cenizas. BLOQUE I y II

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Carbono Fijo %	Poder Calorífico Cal/g	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %
BLOQUE I NIVEL TKg2						
151354	1	83.1	8799	91.45	4.88	1.82
151355	2	83.7	8752	90.05	4.80	1.79
151356	3	83.6	8734	90.14	4.62	1.66
151413	60	82.2	8658	90.57	4.88	1.82
151414	61	80.4	8749	90.29	4.79	1.93
151415	62	78.9	8766	90.91	5.28	2.02
151416	63	80.9	8755	89.00	5.03	1.91
151417	64	79.6	8804	90.36	5.54	1.99
151418	65	76.2	8783	90.36	5.31	2.05
151419	66	76.8	8783	90.72	5.75	1.81
151420	67	77.8	8752	90.43	5.19	1.94
151421	68	79.0	8745	90.71	5.42	1.95
151422	69	80.2	8772	89.90	5.08	2.00
151426	73	79.0	8738	87.35	5.30	1.89
151427	74	78.4	8674	90.21	5.11	1.82
151428	75	78.7	8688	90.84	5.57	2.11
151429	76	79.1	8761	90.35	5.52	1.70
151430	77	80.0	8840	91.41	5.52	2.00
151431	78	75.9	8823	89.70	5.23	1.95
151432	79	76.2	8814	89.87	5.67	1.91
BLOQUE I NIVEL TKg3						
151367	14	71.4	8751	88.46	5.72	1.99
151368	15	70.8	8658	89.01	5.60	1.88
151369	16	72.6	8733	89.13	4.96	1.79
151370	17	71.2	8785	89.23	5.83	1.88
151371	18	71.5	8786	89.31	5.21	1.91
151372	19	70.0	8850	88.27	5.66	1.98
151381	28	72.3	8701	88.62	6.00	1.97
151382	29	71.4	8706	87.56	5.72	1.93
151383	30	74.4	8709	89.38	4.91	1.86
151384	31	79.8	8757	91.21	5.18	1.82
BLOQUE II NIVEL TKg2						
151373	20	69.8	8637	88.16	5.49	1.77
151374	21	69.5	8690	88.38	5.24	1.79
151375	22	69.1	8735	88.80	5.57	1.86
151376	23	69.5	8716	88.10	5.36	1.96
151378	25	71.6	8729	89.12	5.40	1.84
151379	26	70.8	8540	87.05	5.22	1.82
151380	27	74.1	8689	88.10	5.32	1.75
151385	32	80.3	8676	90.13	5.20	1.69
151386	33	81.4	8687	91.27	4.40	1.67
151387	34	79.1	8723	90.66	5.20	1.77
151388	35	79.2	8752	91.38	4.70	1.65
151389	36	79.1	8738	90.79	4.95	1.77
151392	39	65.6	8693	88.74	5.28	2.03
151404	51	72.4	8684	88.29	5.57	1.85
151405	52	71.9	8515	88.34	5.59	2.02
151406	53	72.3	8672	87.74	5.54	2.10
151407	54	71.4	8704	88.95	5.68	2.06
BLOQUE II NIVEL TKg3						
151363	10	68.2	8630	87.99	6.05	1.97
151377	24	71.4	8699	88.73	5.95	1.86
151390	37	68.1	8577	87.95	5.09	1.82
151391	38	65.6	8611	87.53	5.76	1.68
151393	40	60.0	8529	85.66	5.62	1.86
151403	50	66.2	8657	86.73	5.66	2.16

TAB. 16: Resultados del análisis de las muestras de la Zona Checua - Lenguaque, expresados en base seca libre de materia mineral. BLOQUES III y V

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Carbono Fijo %	Poder Calorífico Cal/g	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %
BLOQUE III NIVEL TKg2						
151362	9	67.8	8460	86.28	5.76	1.73
151366	13	65.8	8636	86.09	6.05	2.00
151423	70	70.5	8632	88.75	5.44	2.04
151424	71	72.1	8609	87.17	5.79	1.97
151425	72	72.6	8629	87.63	5.43	1.85
BLOQUE III NIVEL TKg3						
151357	4	62.6	8494	84.83	6.13	2.03
151358	5	62.0	8349	84.92	6.42	1.99
151359	6	61.8	8522	86.09	5.98	1.91
151360	7	66.0	8636	87.06	5.84	1.97
151361	8	64.8	8596	86.23	5.75	1.87
151364	11	70.1	8623	87.52	5.65	1.88
151365	12	68.2	8589	86.40	5.56	1.92
BLOQUE V NIVEL TKg2						
151394	41	75.9	8716	89.86	4.79	1.99
151395	42	81.5	8714	91.60	4.72	1.67
151396	43	80.1	8730	90.04	4.45	1.97
151397	44	78.8	8735	91.18	4.40	1.80
151398	45	78.4	8737	90.95	4.62	1.90
151399	46	79.2	8790	90.82	4.83	2.00
151400	47	79.1	8762	90.37	4.89	1.77
151401	48	76.7	8831	90.68	4.99	2.07
151402	49	80.9	8721	90.79	4.77	1.95
151408	55	77.9	8778	89.98	4.84	2.07
151433	80	81.2	8646	90.06	5.14	1.82
151434	81	80.9	8753	90.47	5.24	1.91
151435	82	81.4	8765	90.48	5.16	1.88
151436	83	80.4	8724	90.23	4.86	1.93
BLOQUE V NIVEL TKg3						
151409	56	74.2	8859	88.59	5.68	2.07
151410	57	74.8	8823	90.10	5.71	2.12
151411	58	75.1	8769	89.14	6.10	2.17
151412	59	73.1	8702	88.16	5.75	2.10

TAB. 17: Resultados de la determinación de Poder Calorífico en las muestras de la Zona Checua - Leguazaque, expresados en base húmeda libre de cenizas. BLOQUE I, II, III y V

Muestra No.IGM	No. de Campo GB-S	Poder Calorífico cal./g.	Muestra No.IGM	No. de Campo GB-S	Poder Calorífico cal/g.
BLOQUE I NIVEL TKg2			BLOQUE II NIVEL TKg3		
151354	1	8604	151363	10	8368
151355	2	8491	151377	24	8433
151356	3	8534	151390	37	8384
151413	60	8478	151391	38	8409
151414	61	8559	151393	40	8314
151415	62	8603	151403	50	8381
151416	63	8572			
151417	64	8616			
151418	65	8601	BLOQUE III NIVEL TKg2		
151419	66	8289			
151420	67	8580	151362	9	8089
151421	68	8502	151366	13	8341
151422	69	8484	151423	70	8283
151426	73	8580	151424	71	8312
151427	74	8470	151425	72	8392
151428	75	8264			
151429	76	8549			
151430	77	8360	BLOQUE III NIVEL TKg3		
151431	78	8651			
151432	79	8563	151357	4	8143
			151358	5	7888
BLOQUE I NIVEL TKg3			151359	6	8153
			151360	7	8449
151367	14	8452	151361	8	8326
151368	15	8347	151364	11	8362
151369	16	8528	151395	12	8347
151370	17	8440			
151371	18	8530			
151372	19	8470	BLOQUE V NIVEL TKg2		
151381	28	8508			
151382	29	8377	151394	41	8551
151383	30	8530	151395	42	8513
151384	31	8473	151396	43	8570
			151397	44	8564
BLOQUE II NIVEL TKg2			151398	45	8564
			151399	46	8644
151373	20	8433	151400	47	8618
151374	21	8476	151401	48	8643
151375	22	8528	151402	49	8505
151376	23	8500	151408	55	8593
151378	25	8545	151433	80	8335
151379	26	8221	151434	81	8594
151380	27	8459	151435	82	8578
151385	32	8470	151436	83	8536
151386	33	8498			
151387	34	8502	BLOQUE V NIVEL TKg3		
151388	35	8582			
151389	36	8556			
151392	39	8405	151409	56	8475
151404	51	8469	151410	57	8467
151405	52	8315	151411	58	8414
151406	53	8469	151412	59	8412
151407	54	8435			

TAB. 18: Resultados de la determinación de Poder Calorífico en las muestras de la Zona Checua - Lenguaque, expresado en base húmeda libre de materia mineral. BLOQUES I, II, III y V

Muestra No. IGM	No. de Campo GB-S	Poder Calorífico cal/g.	Muestra No. IGM	No. de Campo GB-S	Poder Calorífico Cal/g.
BLOQUE I NIVEL TKg2			BLOQUE II NIVEL TKg3		
151354	1	8653	151363	10	8459
151355	2	8571	151377	24	8519
151356	3	8574	151390	37	8442
151413	60	8517	151391	38	8479
151414	61	8598	151393	40	8381
151415	62	8648	151403	50	8471
151416	63	8612			
151417	64	8686			
151418	65	8658	BLOQUE III NIVEL TKg2		
151419	66	8543			
151420	67	8635	151362	9	8195
151421	68	8583	151366	13	8444
151422	69	8586	151423	70	8410
151426	73	8636	151424	71	8399
151427	74	8554	151425	72	8440
151428	75	8489			
151429	76	8630			
151430	77	8613	BLOQUE III NIVEL TKg3		
151431	78	8708			
151432	79	8697	151357	4	8249
BLOQUE I NIVEL TKg3			151358	5	8062
			151359	6	8270
151367	14	8569	151360	7	8532
151368	15	8503	151361	8	8387
151369	16	8596	151364	11	8420
151370	17	8609	151365	12	8404
151371	18	8627			
151372	19	8657	BLOQUE V NIVEL TKg2		
151381	28	8580			
151382	29	8538	151394	41	8597
151383	30	8589	151395	42	8553
151384	31	8615	151396	43	8621
			151397	44	8607
BLOQUE II NIVEL TKg2			151398	45	8609
			151399	46	8689
151373	20	8496	151400	47	8660
151374	21	8541	151401	48	8712
151375	22	8601	151402	49	8621
151376	23	8566	151408	55	8656
151378	25	8618	151433	80	8418
151379	26	8359	151434	81	8629
151380	27	8535	151435	82	8634
151385	32	8522	151436	83	8580
151386	33	8537			
151387	34	8595			
151388	35	8641	BLOQUE V NIVEL TKg3		
151389	36	8625			
151392	39	8518			
151404	51	8524	151409	56	8678
151405	52	8355	151410	57	8575
151406	53	8516	151411	58	8560
151407	54	8538	151412	59	8526

TAB. 19: Resultado del análisis de Dilatometría e Índice de Hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguaque. BLOQUE I.

Muestra No.IGM	No. de Campo	Índice de Hincham.	Dilatación d	Contracc. C	Temper. de ablandam. T ₁ (°C)	Temper. de Máx. contracc. T ₂ (°C)	Temper. de Máx. dilatac. T ₃ (°C)
	GBS	No.	(%)	(%)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)

BLOQUE I NIVEL TKg2

151354	1	8.5	45	20	410	460	495
151355	2	5.5	-22	23	450	485	500
151356	3	6	-21	26	430	465	500
151413	60	7	-9	28	415	465	500
151414	61	8	35	29	395	445	480
151415	62	8	60	30	385	435	485
151416	63	7.5	60	26	395	445	485
151417	64	8	130	27	390	435	485
151418	65	8.5	200	28	365	405	475
151419	66	5	100	24	360	425	475
151420	67	7.5	45	26	385	445	480
151421	68	7.5	45	26	395	445	485
151422	69	8.5	45	20	395	445	485
151426	73	8	50	30	380	435	475
151427	74	7	25	24	390	445	480
151428	75	8.5	45	25	390	435	480
151429	76	8.5	95	26	390	430	485
151430	77	6	-20	21	400	460	485
151431	78	8.5	160	26	375	415	480
151432	79	8.5	200	18	375	410	475

BLOQUE I NIVEL TKg3

151367	14	6	160	28	365	410	460
151368	15	6	210	23	350	405	450
151369	16	8	300	24	350	400	465
151370	17	7	240	18	355	405	460
151371	18	8	290	20	350	395	470
151372	19	6.5	220	20	335	400	485
151381	28	8	140	31	345	400	475
151382	29	6	200	23	345	405	480
151383	30	8	210	27	340	400	480
151384	31	7	45	28	345	420	465

TAB. 20: Resultado del análisis de Dilatometría e Índice de Hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguaque. BLOQUE II.

Muestra No.IGM	No. de Campo	Índice de Hincham.	Dilatación d	Contracc. C	Temper. de ablandam. T ₁ (°C)	Temper. de Máx. contracc. T ₂ (°C)	Temper. de Max. dilatac. T ₃ (°C)
	GBS	No.	(%)	(%)			

BLOQUE II NIVEL TKg2

151373	20	7	140	30	335	415	470
151374	21	7	200	27	355	405	460
151375	22	7.5	310	32	350	400	465
151376	23	7	330	30	335	385	460
151378	25	7.5	230	22	350	395	475
151379	26	6.5	200	30	345	400	475
151380	27	6.5	150	28	345	400	475
151385	32	8	20	29	325	430	475
151386	33	5.5	-28	30	365	465	485
151387	34	7.5	60	30	350	395	455
151388	35	7	55	30	360	405	460
151389	36	8	65	27	365	410	465
151392	39	7.5	280	32	320	370	455
151404	51	7.5	140	31	330	385	460
151405	52	7.5	270	31	325	375	460
151406	53	7.5	210	28	335	380	460
151407	54	8	230	27	330	380	460

BLOQUE II NIVEL TKg3

151363	10	7.5	320	27	330	375	440
151377	24	7	190	32	335	400	465
151390	37	7.5	120	27	325	380	450
151391	38	8	180	30	315	375	445
151393	40	6.5	130	32	315	370	435
151403	50	7	190	26	355	410	465

TAB. 21: Resultado del análisis de Dilatometría e Índice de Hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque. BLOQUES III y V

Muestra No.IGM	No. de Campo	Indice de Hincham.	Dilatación d	Contracc. C	Temper. de ablandam. T ₁ (°C)	Temper. de Máx. contracc. T ₂ (°C)	Temper. de Máx. dilatac. T ₃ (°C)
	GBS	No.	(%)	(%)			
BLOQUE III NIVEL TKg2							
151362	9	3.5	-5	28	365	400	420
151366	13	7	270	33	350	405	465
151423	70	6	130	26	360	425	470
151424	71	6.5	50	25	375	430	465
151425	72	6.5	55	24	365	425	465
BLOQUE III NIVEL TKg3							
151357	4	4.5	85	28	330	390	440
151358	5	3	-8	27	370	420	435
151359	6	3.5	25	27	360	395	440
151360	7	7.5	280	31	330	395	460
151361	8	5.5	190	27	340	380	425
151364	11	8.5	160	37	355	415	465
151365	12	8	230	28	350	410	465
BLOQUE V NIVEL TKg2							
151394	41	8.5	150	24	335	385	465
151395	42	6.5	-21	26	365	440	455
151396	43	9	100	30	355	405	475
151397	44	8	50	34	350	405	460
151398	45	9	80	30	355	400	465
151399	46	9	120	29	350	390	475
151400	47	8.5	110	30	350	385	465
151401	48	> 9	210	28	335	370	475
151402	49	7	40	23	405	450	485
151408	55	8.5	120	28	340	385	465
151433	80	7	-25	25	410	475	
151434	81	8.5	70	24	395	440	485
151435	82	8	50	22	415	450	490
151436	83	8	40	24	400	450	485
BLOQUE V NIVEL TKg3							
151409	56	6.5	170	32	330	375	460
151410	57	7.5	190	26	375	420	475
151411	58	6	95	30	375	420	470
151412	59	7	220	26	370	415	470

cas. Las relaciones de unos con otros se discuten en el numeral 6.6 al final de este capítulo.

Cada parámetro se discute en la base de cálculo más adecuada y de uso más general; por ejemplo gravedad específica, humedades en base como se analizó; materia volátil en base seca libre de cenizas, etc.

Durante la etapa del tratamiento de la información, se observaron las variaciones existentes en la composición química de acuerdo con la ubicación de la muestra. Estas diferencias se hacen perceptibles a todo nivel. Muestras cercanas de un mismo manto, muestras distanciadas pero de igual veta, de la misma mina, del mismo nivel estratigráfico, del mismo bloque, etc., presentan grados crecientes de variación en su composición.

Sería interesante y de aplicación una discusión de resultados, conducente a ver cómo cambia la composición del carbón en un mismo manto a medida que este cambia en su profundidad; o de cómo en una misma mina cambia la calidad de los carbones suministrados de acuerdo con el número de mantos explotados, las lógicas diferencias existentes entre éstos, las proporciones de mezclas de ellos entre sí y con sus respectivos respaldos de techo y piso, etc. Sin embargo esto se aleja un poco de los objetivos propuestos que no son diagnosticar la producción de algunas minas de la zona, o comprobar el efecto de tiempo, temperatura y presión (profundidad) sobre un carbón.

Por otra parte, el número de muestras tomadas sobre el mismo manto o de la misma mina serían insuficientes para abocar este tipo de estudio.

Para poder cumplir con los objetivos del presente trabajo era necesario tratar de cubrir buena parte de la zona, esto es de los bloques que la componen y de los niveles estratigráficos que contienen los carbones económicamente explotables. Algunas restricciones presupuestales obligaron a reducir este estudio al flanco occidental de

la zona dejando el bloque IV y el flanco oriental para estudios posteriores.

El tratamiento estadístico de cada parámetro se efectuó pasando de lo particular a lo general, de forma que se tengan datos de los dos niveles, TKg2 y TKg3, dentro de un mismo bloque, datos del bloque y finalmente datos de la zona.

Como indicativos de la dispersión se utilizaron varias medidas: el rango (R) o sea la diferencia entre el mayor y el menor de los datos, la varianza, la desviación típica y el coeficiente de variación.

Como medida de dispersión relativa generalmente se utiliza el coeficiente de variación, comúnmente expresado como un porcentaje; como ésta medida es independiente de las unidades es útil para comparar distribuciones con unidades diferentes.

Dado que con 83 muestras de la zona ya se puede cuantificar más significativamente la distribución, se calculan para el caso general los momentos, el coeficiente de sesgo y el coeficiente de curtosis, útiles para apreciar la forma de la distribución. El sesgo da el grado de asimetría. Una "cola" más larga a la derecha del máximo central que a la izquierda se llama sesgada a la derecha o con sesgo positivo; lo contrario es sesgada a la izquierda o sesgo negativo.

La curtosis mide el grado de apuntamiento de la distribución en relación con la distribución normal (SCHAUM, 1970).

La distribución normal tiene un coeficiente de sesgo = 0 y un coeficiente de curtosis = 3; estas referencias son útiles para comparar las distribuciones obtenidas con la normal.

Como un complemento de gran ayuda visual se muestran los diferentes histogramas agrupados en cada parámetro, conservando la misma metodología, diferenciándolos por niveles y bloques y presentando uno general para la zona.

Las fórmulas estadísticas utilizadas para las diferentes medidas se resumen en el Apéndice 1. El estudio correlativo se efectuó con base en el coeficiente de correlación r . En los casos donde se halló un valor altamente significativo se efectuó el análisis de regresión lineal, obteniéndose la ecuación de la recta. Igualmente se muestra la gráfica correspondiente.

En el caso particular de la relación de las temperaturas de ablandamiento, y de máxima contracción, con las materias volátiles, se vió que la forma de las curvas no correspondía muy bien a una recta; se efectuó entonces regresión para ajuste a una curva de tipo cuadrática y logarítmica obteniéndose la mejor correlación para esta última.

Finalmente, para los diferentes parámetros se efectuó un análisis tendiente a mostrar las variaciones que estas muestran en los diferentes bloques y niveles para lo cual se emplearon los promedios respectivos. La Figura 5 resume la base en que se discute cada parámetro y las correlaciones más importantes.

6.2. ANALISIS PROXIMO

Bajo este nombre se agrupan las determinaciones de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo (ASTM 1982). A continuación se discute cada una de estas determinaciones.

6.2.1. HUMEDAD RESIDUAL

Existen varios términos que se refieren a la humedad del carbón, tales como humedad "como se recibió", humedad total, humedad de secado al aire, inherente, "como se analizó", etc. Se hace necesario clarificar a qué nos referimos con el término humedad residual.

Como la preparación de la muestra lleva un secado inicial que consiste en lograr un nivel de equilibrio, después de un secado generalmente a unos 10-15°C por encima de la temperatura ambiente, se denomina humedad residual el contenido de agua que permanece en el carbón después de dicho trata-

miento. Esta humedad es el nivel al cual son determinados los otros parámetros. Se puede también encontrar como sinónimo el término "como se analizó".

Puesto que la humedad siempre está presente en los carbones, ésta se considera como un componente y puede llegar a valores tan elevados como 70% en algunos lignitos.

Dado que para poder convertir los valores de ciertos parámetros a otras bases de cálculo, clasificar el carbón, manejarlo, comercializarlo y procesarlo es necesario conocer el valor de la humedad, este es un parámetro indispensable en cualquier análisis.

Como no fue posible minimizar el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y el análisis, pueden haber ocurrido algunos cambios del contenido de humedad total; por tal motivo no se reportan en este trabajo. Sin embargo, a título indicativo se calcularon para algunas muestras obteniéndose valores que oscilan entre 1.4 y 3.9 %.

Las distribuciones de la humedad residual de los diferentes bloques y niveles se muestran en la Figura 6 y la general para la zona en la Figura 7. Al comparar las distribuciones de humedad residual en los distintos bloques, se puede apreciar un pequeño desplazamiento hacia la derecha, es decir hacia valores más altos de humedad, a medida que se va hacia el sur.

La diferencia de humedad entre los dos niveles en un mismo bloque no es muy clara, pero se pueden apreciar también valores superiores para el nivel TKg3 respecto al TKg2. Observando los promedios en la Tabla 22 que resume la estadística para este parámetro, o la variación de promedios según bloque y nivel, que se presenta en las figuras 30 y 31, se ve más claramente este hecho.

La distribución de la humedad residual en la zona, muestra un sesgo positivo (cola hacia la derecha); la moda o valor más común es 0.5 %. El valor relativamente alto de curtosis nos indica una distribución leptot-

FIG. 5: Presentación de histogramas y correlación según las diferentes bases del cálculo.

DETERMINACION	Base como se analizó						Base Seca						B. Seca Libre Cenizas						B. Seca Libre Mat. Min						B. Humeda Libre Cz.					
	Histogramas					Correlación	Histogramas					Correlación	Histogramas					Correlación	Histogramas					Correlación						
	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV	General		Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV		General	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III		Bloque IV	General	Bloque V	Bloque I	Bloque II		Bloque III	Bloque IV	General			
Gravedad Específica Aparente																														
Humedad de Equilibrio (HE)	X	X	X	X	X	HR																								
Humedad Residual (HR)	X	X	X	X	X	HE																								
Cenizas (Cz)						C	X	X	X	X	X	PC																		
Materia Volátil (MV)													X	X	X	X	X	C, MV, PC												
Carbono Fijo (CF)																			X	X	X	X	X	C						
Poder Calorífico (PC)						C	X	X	X	X	X	CZ	X	X	X	X	X	MV, CZ												
Azufre (S)							X	X	X	X	X																			
Carbono (C)						PC, CZ							X	X	X	X	X	PC, MV												
Hidrógeno (H)													X	X	X	X	X	C, MV												
Nitrógeno (N)													X	X	X	X	X													
Indice de Hinchamiento (IHL)	X	X	X	X	X	HR																								
Indice de Molienda (IMH)	X	X	X	X	X	MV																								

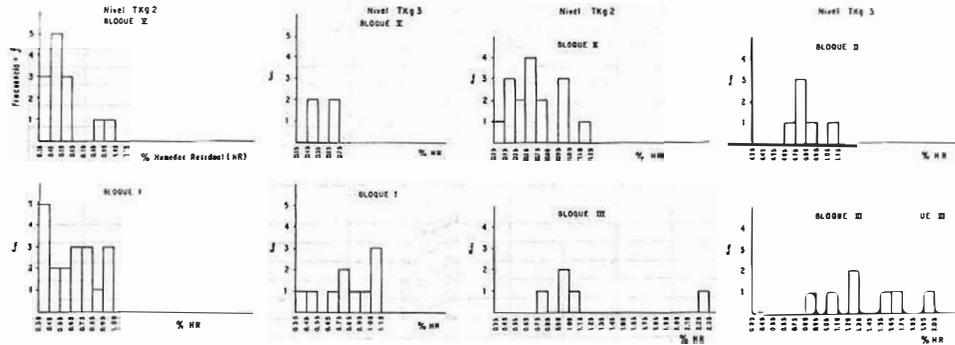


FIG. 6: Distribución de la humedad residual en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

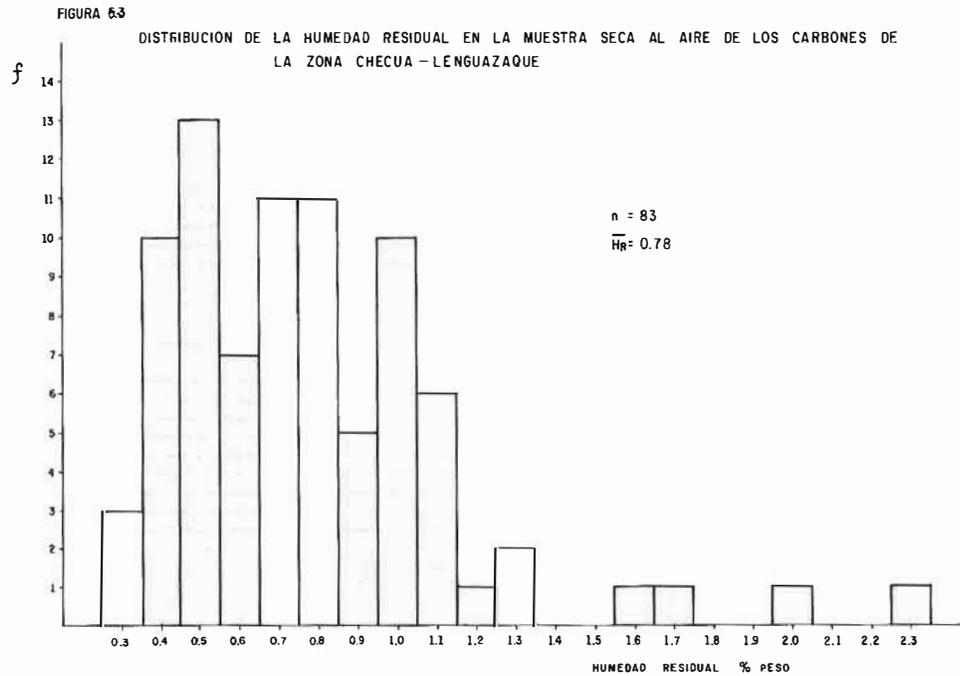


FIG. 7: Distribución de la humedad residual en la muestra seca al aire, de los carbones de la Zona Checua - Lenguaque.

TAB. 22: Humedad Residual (Base como se analizó) Zona Checua - Lenguazaque (General).

n	83
\bar{X}	0.78
MAX.	2.3
MIN.	0.3
R	2.0
S ²	0.13
S	0.36
V	46.33
M 2	0.13
M 3	0.074
M 4	0.114
γ 1	1.61
γ 2	6.93

	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
n	18		30		23		12	
\bar{X}	0.56		0.71		0.74		1.34	
MAX.	1.0		1.1		1.2		2.3	
MIN.	0.3		0.3		0.3		0.8	
R	0.7		0.8		0.9		1.5	
S ²	0.031		0.062		0.051		0.217	
S	0.18		0.25		0.23		0.47	
V	31.25		35.16		30.30		34.74	

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	0.55	0.60	0.65	0.84	0.71	0.85	1.24	1.41
MAX.	1.0	0.7	1.0	1.1	1.2	1.1	2.3	2.0
MIN.	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.7	0.80.9	0.9
R	0.7	0.2	0.7	0.7	0.9	0.4	1.5	1.1
S ²	0.036	0.013	0.049	0.063	0.058	0.019	0.363	0.141
S	0.19	0.12	0.23	0.25	0.24	0.14	0.60	-0.38
V	34.75	19.25	35.38	29.80	34.14	16.22	48.59	26.59

cúrtica (apuntamiento alto) que implica una buena centralización de los valores.

Como ilustración de la utilidad de los valores de humedad y a manera de ejemplo, se analiza la influencia de este parámetro en los dos procesos más comunes de utilización de carbón: combustión y coquización.

En combustión, el manejo de las partículas de carbón que llegan a alimentar la caldera es primordial; los problemas en el manejo al menos en el rango del carbón bituminoso, son debidos principalmente al contenido de humedad y al tamaño del carbón; el efecto de estas dos variables está generalmente correlacionado (COAL PROCESSING CONSULTANTS LTD., 1980).

La Figura 8a muestra la relación entre la humedad superficial (humedad total menos humedad de equilibrio) y el contenido de finos, mostrando las zonas donde se presentarían problemas de manejo y las libres de ellos según se encontró en una estación de la Central Electricity Generating Board (DADSWELL & DEANSFIELD, 1957).

Lógicamente el contenido de humedad también es necesario para los cálculos de combustión (FRANCIS, 1969).

La humedad libre afecta el comportamiento en la coquización como sigue (FRANCIS, 1969): retarda el proceso alargándose en aproximadamente 1/4 a 3/4h por cada 1 % de humedad libre. La humedad libre tiene un efecto pequeño pero apreciable en los rendimientos de alquitrán, amoníaco y gas. La humedad libre ayuda a impedir la pérdida de finos de carbón durante la carga de los hornos. En la Figura 8b se muestra la variación de la densidad de carga en función de la humedad de la mezcla a coquizar.

El efecto de la humedad del carbón o mezclas coquizables sobre la calidad del coque también ha sido estudiado por varios autores. La Figura 9 muestra los resultados de ensayos con carbones puros y mezclas coquizables, con la influencia de la humedad sobre la calidad del coque, medida con los

índices Micum 40 y Micum 10. (El Micum 10 mide la resistencia a la abrasión del coque; son deseables valores bajos. El Micum 40 es un índice de fisuración; se buscan valores altos).

La influencia de la humedad se manifiesta sobre todo en los índices M10 que crecen con la humedad en todos los tipos de carbón, variando, solo la forma de la curva según la naturaleza de la mezcla. Con un buen carbón de coque duro el efecto es poco marcado y se manifiesta solo en humedades inferiores a 6%.

La influencia de la humedad en el Micum 40 es poco marcada (LOISON et al, 1970).

6.2.2. LAS CENIZAS DEL CARBON

Este es uno de los parámetros más requeridos de un análisis de carbón, pues es un componente que afecta todo tipo de proceso con este combustible.

La Tabla 23 resume la estadística para este parámetro, que se discute en base seca para eliminar la influencia de la humedad en los resultados y poderlos comparar en igual forma.

La observación de los histogramas para los diferentes bloques y niveles (Fig. 10), no permite encontrar variaciones sistemáticas.

Las figuras 31 y 32 tampoco permiten establecer ningún tipo de tendencia para las cenizas en bloques y niveles. El histograma general para este parámetro (Fig. 11), muestra una distribución con sesgo positivo.

Este tipo de distribución era de esperarse puesto que existe una barrera natural en el contenido de cenizas, las cenizas singénicas, y por debajo de este valor no se registran resultados. Para el caso de la zona estudiada este valor se localiza entre el 3 y 4 % de cenizas. Este hecho hace que el histograma esté cargado hacia un valor produciéndose además colas hacia la región de mayor contenido de cenizas.

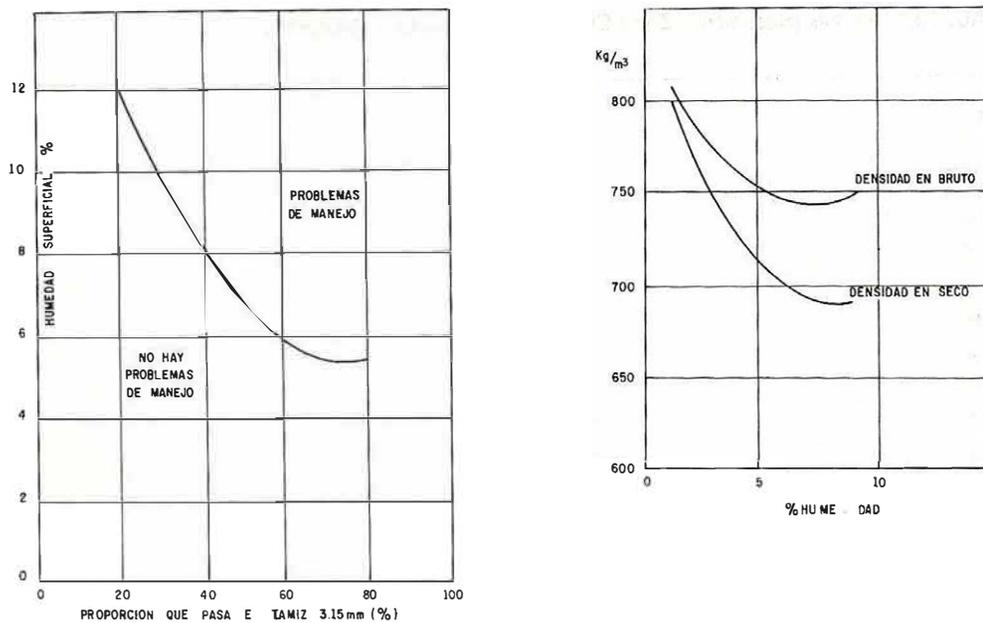


FIG. 8: Influencia de la humedad :
 a) Relación entre la humedad superficial; el contenido de finos y la facilidad de manejo. (COAL PROCESSING CONSULTANT LTD, 1980).
 b) Variación de la densidad de carga en función de la humedad de la mezcla a coquizar. (LOISON, et al., 1970).

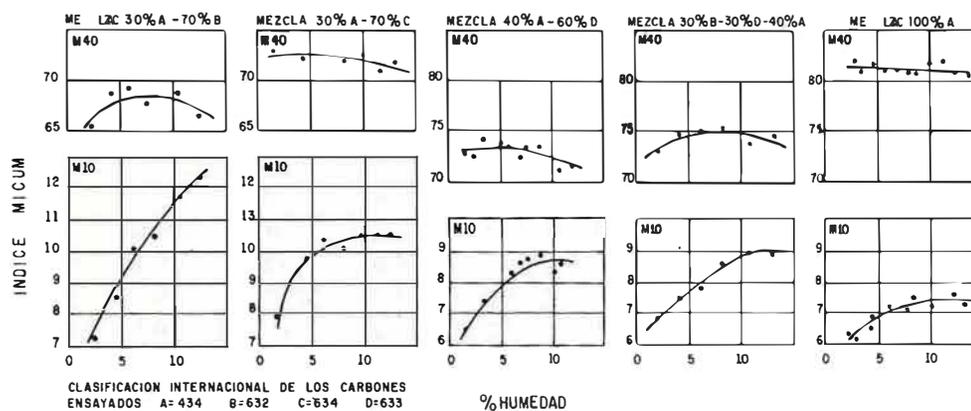


FIG. 9: Influencia de la humedad sobre la calidad del coque (LOISON, et al., 1970).

TAB. 23: Cenizas (Base Seca) Zona Checua - Lenguazaque (General).

n					83			
X					9.05			
MAX.					26.3			
MIN.					3.5			
R					22.8			
S ²					23.73			
S					4.87			
V					53.83			
M 2					23.44			
M 3					173.81			
M 4					3030.82			
γ 1					1.53			
γ 2					5.51			
<hr/>								
	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
<hr/>								
n	18		30		23		12	
X	7.43		10.47		7.97		10.00	
MAX.	17.6		26.3		14.6		17.1	
MIN.	3.5		4.2		4.1		5.4	
R	14.1		22.1		10.3		11.7	
S ²	17.36		0.24		6.67		13.36	
S	4.17		0.49		2.58		3.65	
V	56.09		56.98		32.42		36.55	
<hr/>								
	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel
	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3
<hr/>								
n	14	4	20	10	17	6	5	7
X	5.86	12.90	9.80	11.82	7.92	8.08	10.60	9.57
MAX.	13.2	17.6	26.3	16.6	14.6	9.9	15.1	17.1
MIN.	3.5	8.0	4.2	5.6	4.3	5.8	5.4	5.6
R	9.7	9.6	22.1	11.0	10.3	4.1	9.7	11.5
S ²	7.12	16.18	52.94	19.80	8.18	3.12	11.95	16.01
S	2.67	4.02	7.28	4.45	2.86	1.77	3.46	4.00
V	45.50	31.18	74.24	37.65	36.11	21.86	32.61	41.80
<hr/>								

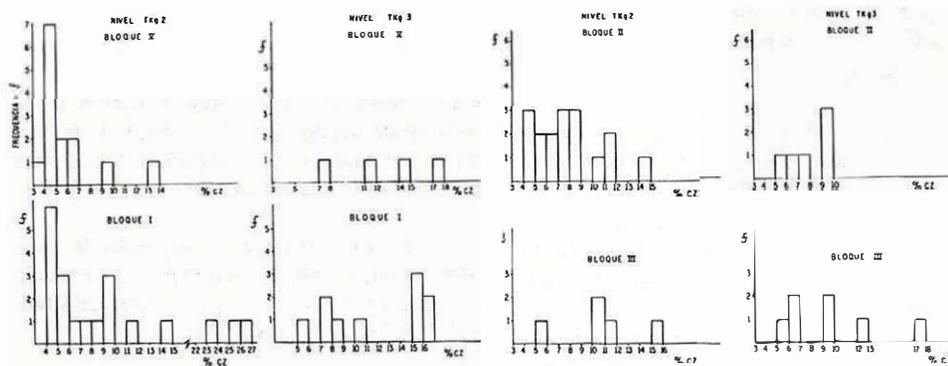


FIG. 10: Distribución del contenido de cenizas (Base seca) en los diferentes bloques y niveles de la zona Checua - Lenguaque.

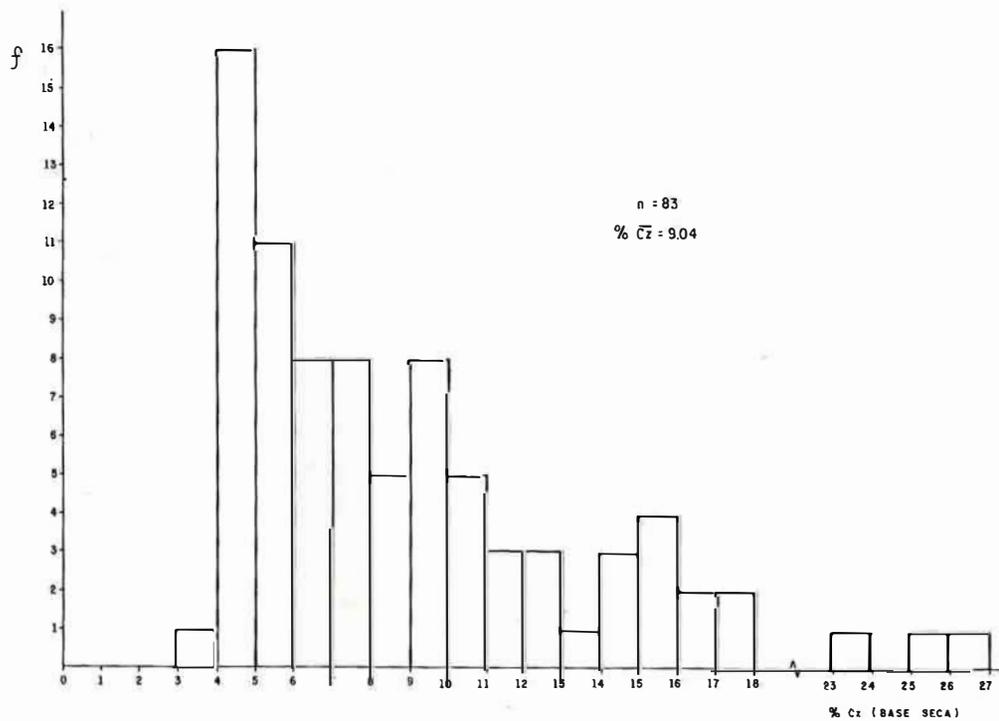


FIG. 11: Distribución del contenido de cenizas (Base seca) de las muestras de la zona Checua - Lenguaque.

Nótese que el promedio encontrado para la zona ubica a estos carbones como relativamente limpios, más aún cuando existen tres muestras con valores anormalmente altos para la zona, que pueden limitar la utilización de la media como medida de centralización.

Posiblemente en estos casos la determinación de la mediana sea más conveniente, puesto que esta medida no es tan grandemente afectada por valores extremos. El valor de la mediana de 7.4 % y la moda de 4.5 % muestran tenores bajos para la zona.

Además de la utilización del contenido de cenizas en la conversión de otros datos a base seca libre de cenizas y de material mineral, éste es de una aplicación directa muy amplia. Algunos ejemplos se dan a continuación a título indicativo, pues sería tema para profundizar. La exigencia de muchas coque-rías de contar para su proceso con carbones de menos del 10 % en cenizas se cumpliría para un 67 % de las muestras de Checua-Lenguazaque.

Los efectos de un alto contenido de cenizas en las propiedades físicas del coque son disminuir la dureza y la resistencia a la abrasión. El porcentaje máximo deseable de cenizas en este aspecto es de 7.5% (FRANCIS, 1969).

La influencia del contenido de cenizas en la marcha del alto horno depende de las condiciones utilizadas; pero generalmente existen penalizaciones del precio del coque con el contenido de cenizas. En Francia por ejemplo se penaliza en un 2.5 % el precio del coque por un aumento del 1% de las cenizas (LOISON, et al, 1970).

En el manejo y combustión del carbón el efecto obvio de la materia mineral es el de diluyente del material que pasa a través del proceso sin proveer energía útil al sistema; desafortunadamente el efecto es mayor que una simple carga de inerte pues entra en juego la composición de la ceniza (COAL PROCESSING CONSULTANTS, 1980).

Algo sobre el encostramiento y la formación de depósitos en las calderas debido a la materia mineral del carbón es discutido en el Capítulo 8. También es conocido el efecto de las cenizas en la preparación o pulverización del carbón. Algunos constituyentes de la ceniza como la sílice y la pirita son abrasivos produciendo el consecuente desgaste de los equipos. La erosión de los tubos en las calderas debe ser impedida con las velocidades de gas adecuadas.

El otro efecto del contenido de cenizas en la pulverización es que puede producir un sobremolido (COAL PROCESSING CONSULTANTS, 1980).

Los niveles comunes aceptables del contenido de cenizas en el diseño de calderas son: un mínimo no aplicable y un máximo de 22% (McBRIDE, 1981). Según este criterio el 96% de los carbones muestreados en la zona Checua-Lenguazaque serían adecuados por lo menos en cuanto a nivel de cenizas se refiere.

En centrales térmicas se emplean a veces carbones con tenores más elevados en cenizas; por ejemplo en la Central de la Electricidad de Boyacá S.A. se pueden quemar hasta mixtos de 40% de inertes.

En los procesos de lavado, el contenido de ceniza es un valor primordial, tanto para la escogencia del método de lavado, como para juzgar lo adecuado de un proceso de limpieza (REES, 1966).

En la planta de Paz del Río se consideran tres fracciones de lavado, una con contenido de cenizas inferior al 9% utilizado en la fabricación de coque o en plantas térmicas, otra con ceniza entre 9 y 30% usada sólo en plantas térmicas y la fracción con más de 30% de cenizas consideradas como estéril desechable (MARTINEZ, 1973).

6.2.3. LA MATERIA VOLATIL

El hecho de que la materia volátil haya sido considerada por mucho tiempo un

buen indicativo para la predicción del grado de carbonificación de los carbones, del rango coquizable, de la reactividad y que sea un parámetro de clasificación en muchos sistemas, nos indica la importancia de este componente.

La base más comúnmente usada cuando se habla de la materia volátil, es seca libre de cenizas (o "carbón puro"); por ser la más adecuada se escogió esta base en la discusión de este parámetro.

La observación del resumen de la estadística para la materia volátil, Tabla 24, y de los histogramas de la distribución por bloques y niveles, Figura 12, nos muestra a primera vista que existen variaciones tanto en la horizontal como en la vertical de la zona.

Las variaciones en la horizontal son las más evidentes y podemos notar, al comparar las distribuciones desde el Bloque V al III, como las poblaciones se van desplazando hacia los valores de mayor contenido de volátiles a medida que se avanza hacia el sur en el flanco occidental del sinclinal; los promedios del contenido de materia volátil para cada bloque también muestran este hecho. La diferencia de rango resultante es notable, presentándose diferencias del orden del 12% de volátiles entre el Bloque V y el III.

La distribución general para toda la zona se muestra en el histograma de la Figura 13. Las diferencias entre el nivel TKg2 y TKg3, también permiten deducir un mayor rango para los carbones del nivel TKg2.

A este respecto y con el fin de ver más claramente este efecto, se representa para cada bloque la profundidad relativa, obtenida de las columnas estratigráficas respectivas, contra el porcentaje de materias volátiles. Las figuras 14, 15 y 16 muestran esta relación. Ya que las muestras no son tomadas de perforaciones verticales, algunas variaciones laterales en el estrato pueden afectar estas relaciones.

En general se obtuvieron buenos coeficientes de correlación los cuales confirman

la Ley de Hilt de la influencia de la profundidad (presión, tiempo y temperatura) sobre el rango de los carbones. Se obtuvo la ecuación de la recta para cada bloque, determinada por regresión lineal. Estas ecuaciones permiten determinar en forma aproximada, para el Bloque V, una disminución del 2% de M.V. por cada 100 m de aumento en la profundidad, del 3% para los bloques I y II y del 2.5% para el III.

Hay que anotar que el término profundidad, como se emplea en este parágrafo, hace referencia a la posición relativa en la columna estratigráfica y no a su posición actual en el sinclinal.

Para un estudio más profundo de la variación del rango con la profundidad en esta zona, sería necesario contar con varias muestras de un mismo manto, lo cual permitiría trabajar con los promedios, pues en este estudio sólo se cuenta con valores puntuales de la mayoría de capas.

Desde el punto de vista de los procesos de combustión y coquización las materias volátiles juegan un papel importante.

Los equipos utilizados en combustión fijan límites en el contenido de materias volátiles. Niveles muy bajos producen a menudo una baja reactividad de la combustión y por tanto el carbón puede atravesar el horno sin reactivarse con la consecutiva pérdida de eficiencia térmica y otros problemas adicionales.

Una caldera típica de combustible pulverizado (P.F.) trabaja con un nivel mínimo aceptable de 24% de materia volátil (s.l cz.) y con un máximo de 44%. Un carbon por debajo del nivel mínimo no contendría los suficientes volátiles para estimular la iniciación de la llama en el quemador. Con niveles superiores al 44% estaríamos en el campo de los lignitos, generalmente asociados con una alta humedad, presentando problemas con la estabilidad de la llama (McBRIDE, 1981).

El contenido de materia volátil es

TAB. 24: Materia Volátil (Base seca libre de Cenizas), Zona Checua-Lenguazaque (General).

n	83							
\bar{X}	26.44							
MAX.	40.5							
MIN.	16.9							
R	23.6							
S ²	34.38							
S	5.86							
V	22.18							
M2	33.97							
M 3	76.52							
M 4	2633.63							
γ 1	0.39							
γ 2	2.28							
	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III				
n	18	30	23	12				
\bar{X}	22.47	23.84	29.09	33.80				
MAX.	28.1	31.8	40.5	39.4				
MIN.	18.9	16.9	19.0	27.9				
R	9.2	14.9	21.5	11.5				
S ²	9.23	19.21	28.91	15.59				
S	3.04	4.38	5.38	3.95				
V	13.53	18.38	18.48	11.68				
	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel
	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	21.12	27.18	21.44	28.66	27.32	34.10	31.10	35.73
MAX	24.6	28.1	25.7	31.8	35.4	40.5	35.1	39.4
MIN.	18.9	26.4	16.9	21.6	19.0	29.4	27.9	30.5
R	5.7	1.7	8.8	10.2	16.4	11.1	7.2	8.9
S ²	3.12	0.82	6.92	8.60	22.70	13.79	9.17	12.05
S	1.77	0.90	2.63	2.93	4.76	3.71	3.03	3.47
V	8.36	3.32	12.28	10.23	17.44	10.89	9.73	9.72

FIGURA 99. DISTRIBUCION DE LA MATERIA VOLATIL (S.L.C.Z.) EN LOS DIFERENTES BLOQUES Y NIVELES D

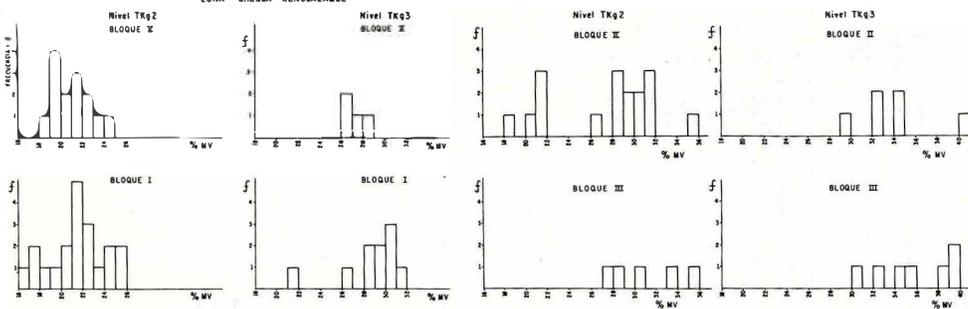


FIG. 12: Distribución de la materia volátil (s.l.c.z.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

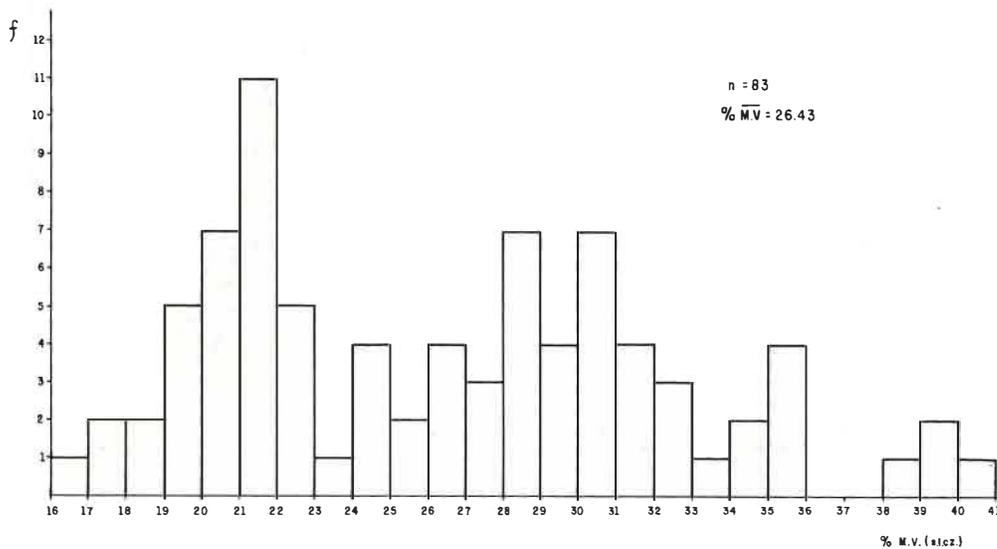


FIG. 13: Distribución del contenido de materias volátiles (% s.l.c.z.) de las muestras de las Zona Checua - Lenguaque.

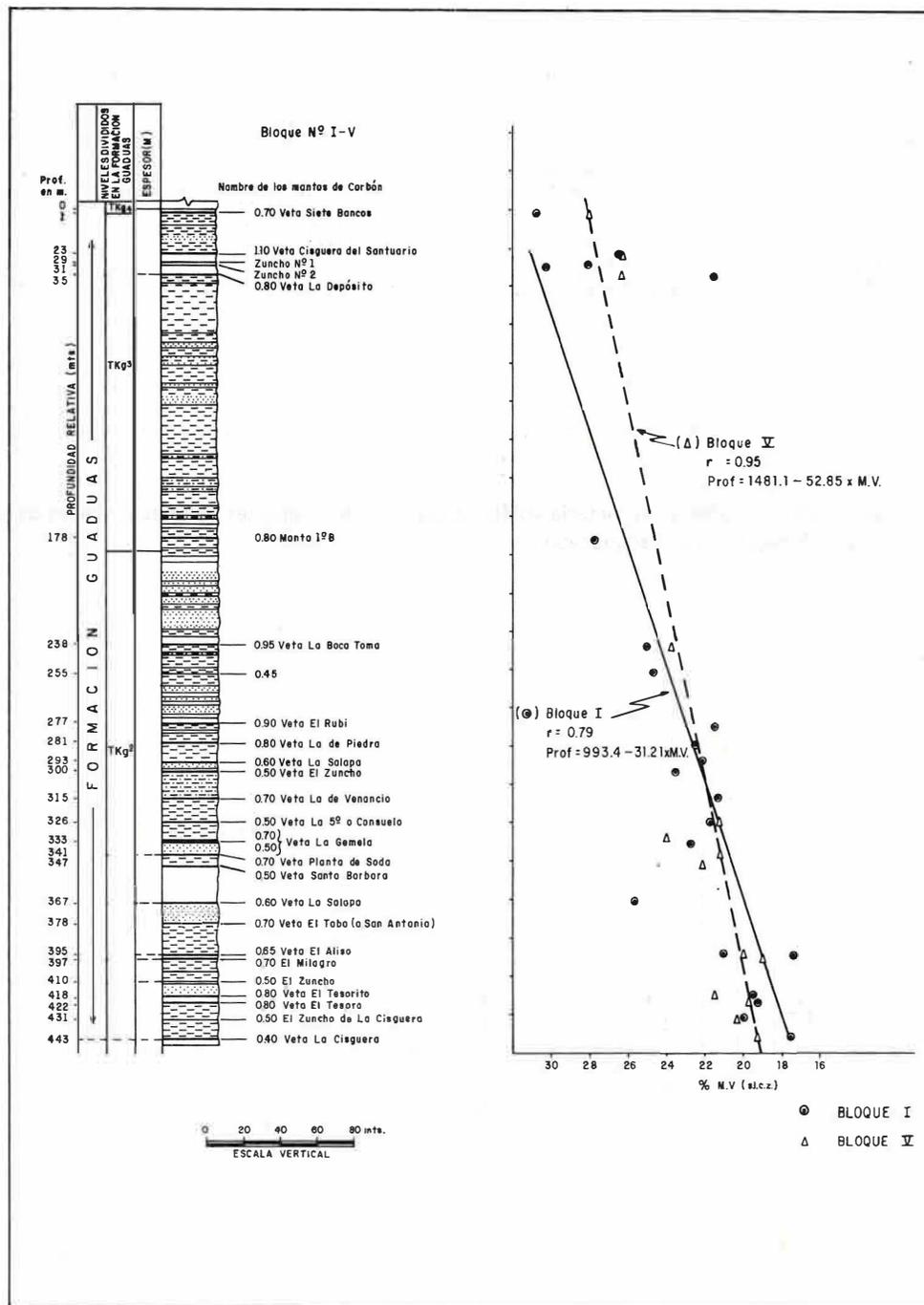


FIG. 14: Correlación del contenido de materias volátiles (b.s.l.c.z.) y la profundidad relativa en las muestras de los bloques I y IV de la zona Checua - Lenguazaque.

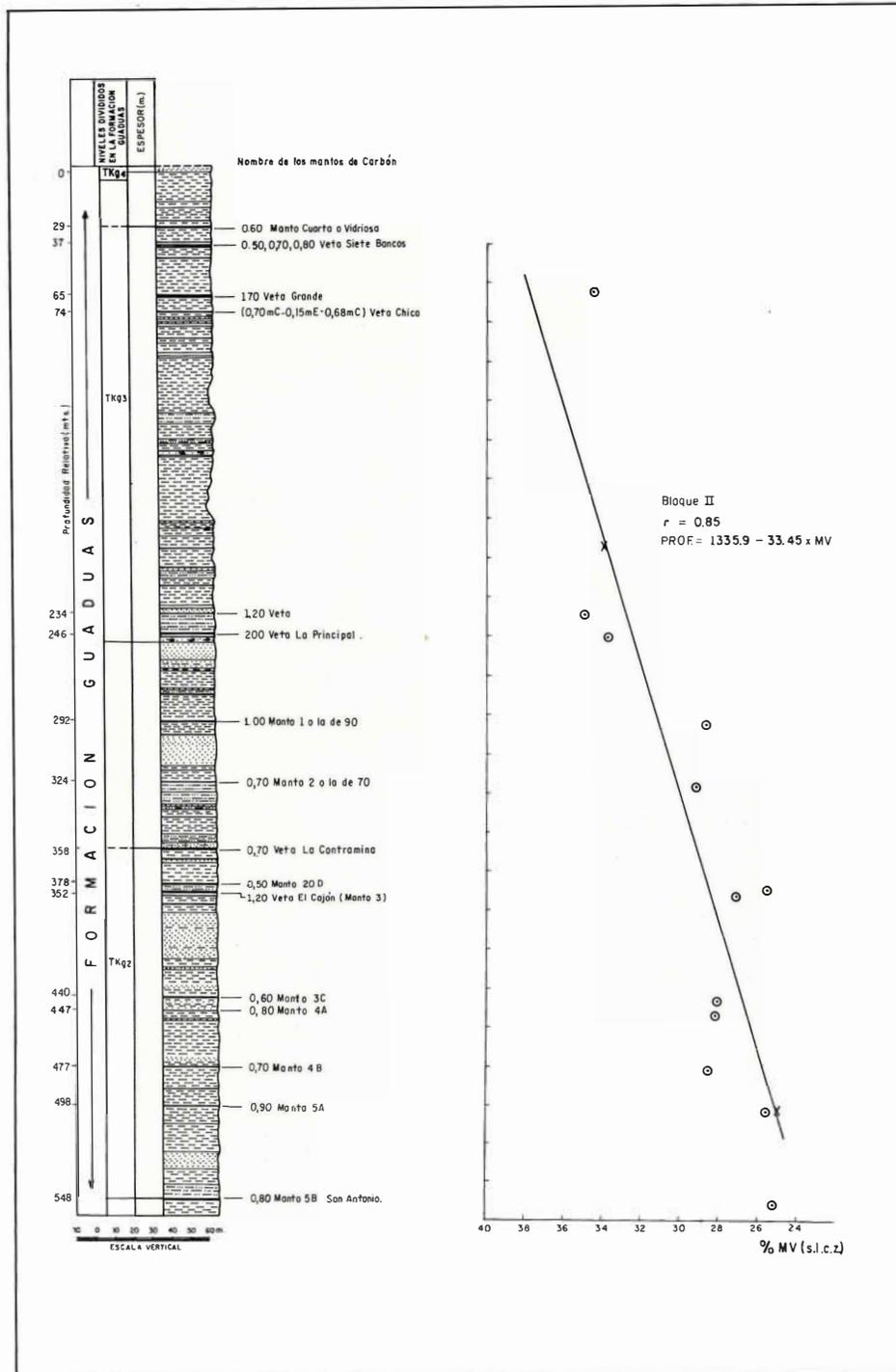


FIG. 15: Correlación de materias volátiles (s.l.c.z.) y la profundidad relativa en las muestras del bloque II de la Zona Checu - Lenguaque.

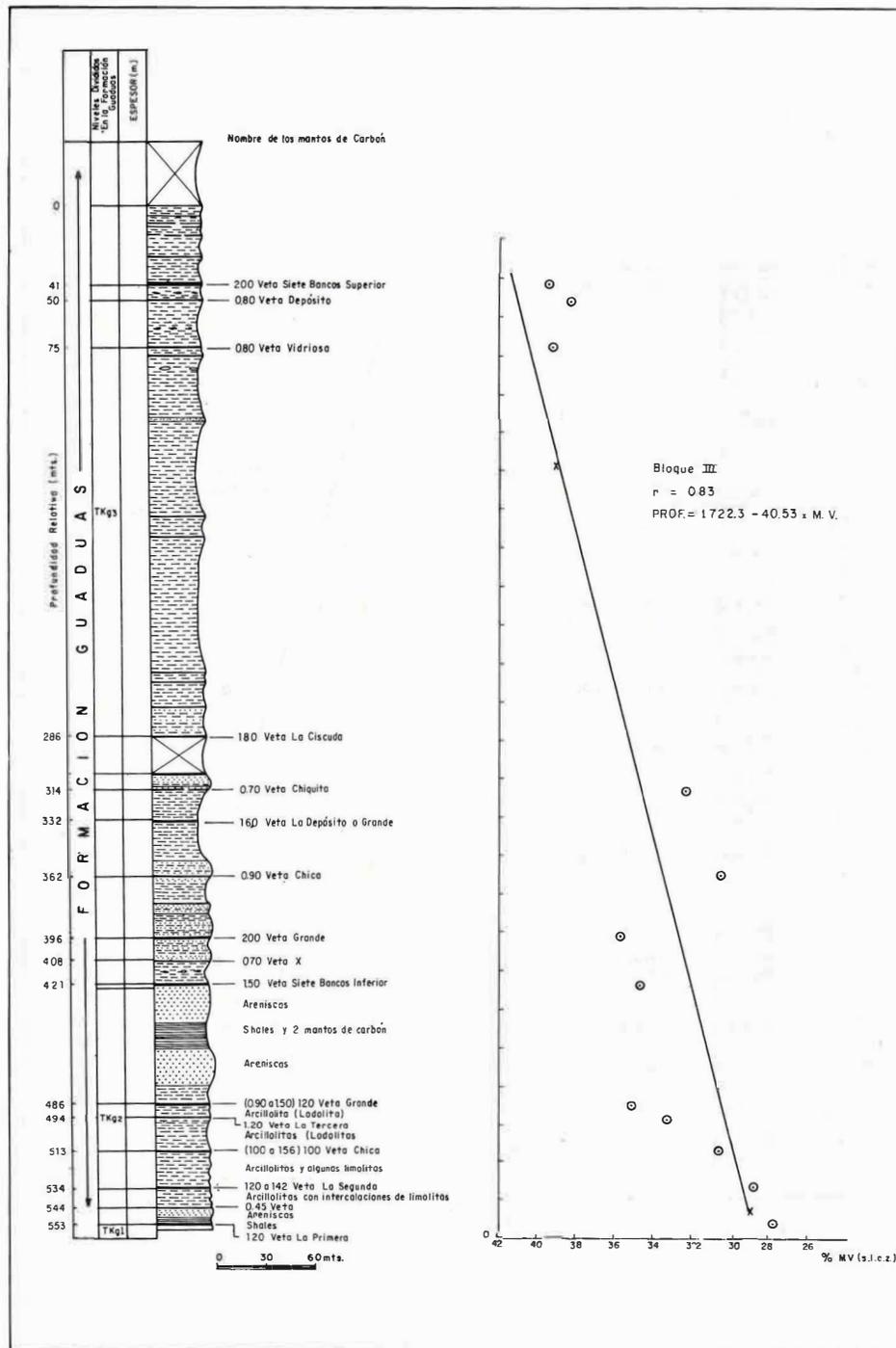


FIG. 16: Correlación del contenido de materias volátiles (b.s.l.c.z.) y la profundidad relativa en las muestras del Bloque III de la zona Checua - Lenguazaque.

también un parámetro primordial en el diseño de las calderas (COAL PROCESSING CONSULTANTS, 1980).

Existe igualmente una relación entre el contenido de M.V. y el "rango coquizable", ubicándose éste entre el 20 y el 32%, lógicamente sin querer decir esto que carbones de rango superior o inferior no se puedan usar en mezclas, como aditivos o modificadores en el proceso de coquización (GIBSON, 1971).

6.2.4. CARBONO FIJO

Cuando se expresan la materia volátil y el carbono fijo en base seca libre de cenizas o seca libre de materia mineral, la suma de los dos componentes da el 100%. Esto implica la relación lineal entre estos dos parámetros. Con el fin de tener otros elementos de información, el carbono fijo se trató en base seca libre de materia mineral, base que a la vez nos ubica dentro del marco para la clasificación ASTM. La Figura 17 muestra la distribución general de este parámetro en la zona.

Las conclusiones obtenidas obviamente confirman lo dicho para la materia volátil, esto es aumento de rango (aumento de % C.F.) de sur a norte en el sinclinal (Bloques III, II, I y V), igualmente mayor rango en los carbones del nivel TKg2 que en los TKg3 (Figura 18 y Tabla 25)

6.3. ANALISIS ULTIMO

Se discute en este numeral la composición elemental del carbón en términos de su contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, este último determinado por diferencia.

6.3.1. CARBONO

En la Figura 19 se observa la distribución de los valores de carbono (base s.l cz) de las 83 muestras bajo estudio; se presenta sesgada a la izquierda ($\gamma = -0.57$) y de tipo leptocúrtica ($\gamma_2 = 2.85$), indicando que la mayoría de valores son altos; el carbono

varía en la zona de 82.51 a 91.01%, con un promedio de 87.91%. De los histogramas dados por este parámetro para los diferentes bloques y niveles (Figura 20), se deduce una disminución gradual de carbono del Bloque V hasta el III; en efecto, los valores promedio para cada bloque presentados en la Tabla 26 corroboran la variación anotada.

Como se observa en la misma tabla, al comparar los niveles entre sí resulta evidente el mayor contenido de carbono del nivel TKg2 respecto al TKg3. Ya que uno de los cambios principales con el aumento de rango, es el relativo a la composición elemental y particularmente al progresivo y uniforme aumento del carbono, se concluye que los carbones del nivel TKg2 son de mayor rango que los del TKg3, y además que existe un aumento gradual en la carbonificación del sur hacia el norte del sinclinal.

6.3.2. HIDROGENO

Se encuentra que este elemento varía en la zona entre 4.37 y 6.24%, con un valor promedio de 5.27%.

El hidrógeno es otro parámetro utilizado para medir los cambios en el rango del carbón; varía en forma inversa a la del carbono. Disminuye gradualmente a medida que crece el rango hasta que el carbono alcanza un valor de 89% y luego más rápidamente.

En la Figura 21 se observa el aumento de hidrógeno del bloque V hacia el III, hecho que indica la disminución de rango en el sentido norte-sur del sinclinal.

Comparando los promedios entre los niveles (Tabla 27 y Figura 33) se observa que el nivel TKg2 tiene menor contenido de hidrógeno que el TKg3 para los cuatro bloques, lo cual demuestra el mayor rango de los carbones del primer nivel respecto al segundo. La distribución de los valores obtenidos para toda la zona se muestra en la Figura 22.

Hickling encontró que pequeñas va-

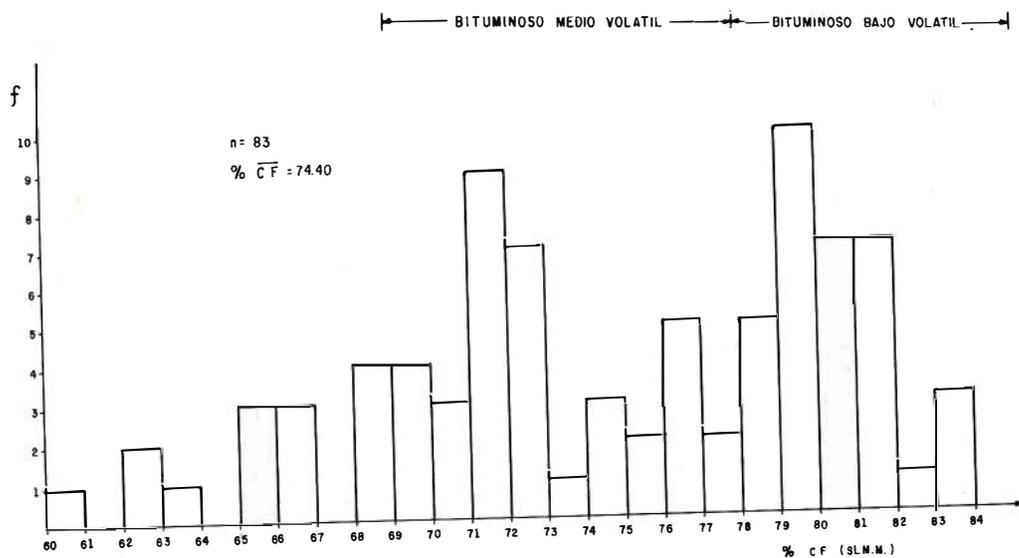


FIG. 17: Distribución del carbono fijo (s.l.m.m.) en las muestras de la Zona Checua-Lenguazaque.

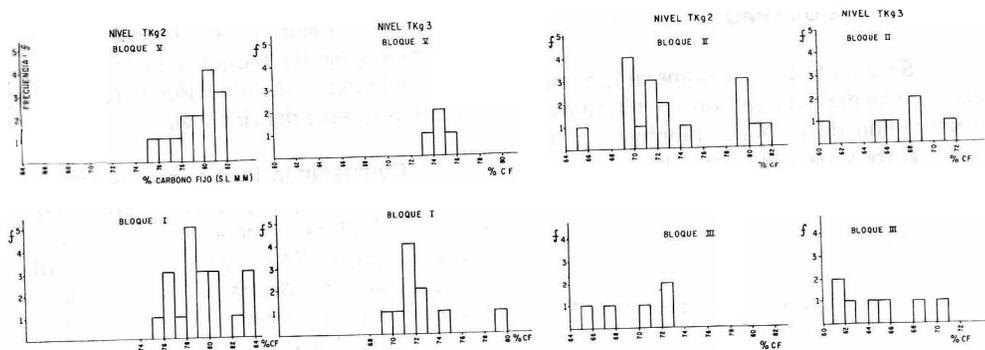


FIG. 18: Distribución del carbono fijo (s.l.m.m.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque.

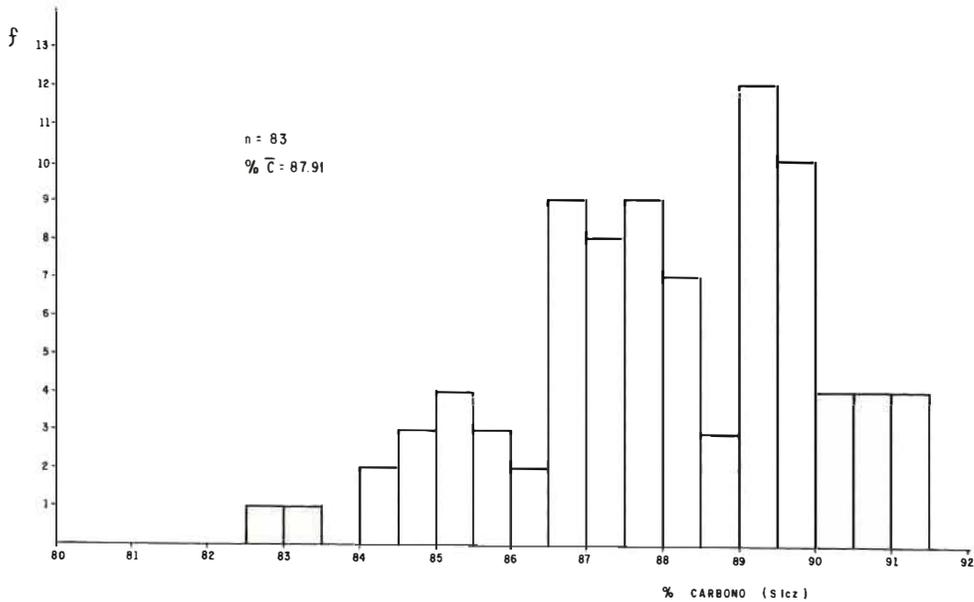


FIG. 19: Distribución general del contenido de carbono elemental (b.s.l.cz.) de las muestras de la Zona Checuá - Lenguaque.

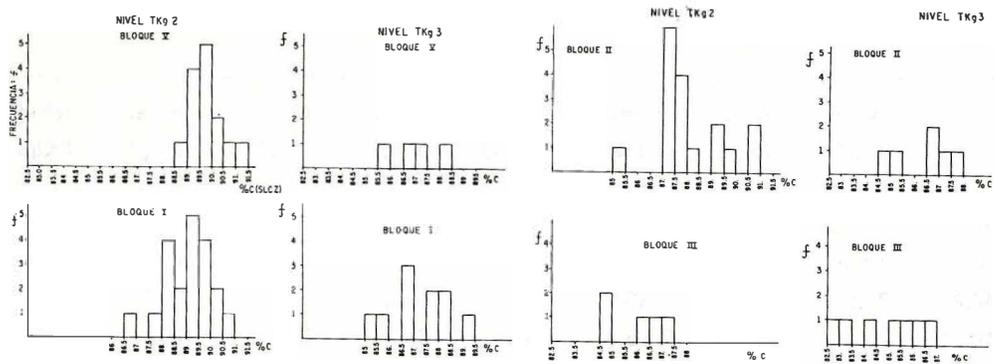


FIG. 20: Distribución del contenido de carbono (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checuá - Lenguaque.

TAB. 25: Carbono fijo (Base Seca Libre de Materia Mineral), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	74.40
MAX.	83.7
MIN.	60.0
R	23.7
S ²	33.57
S	.79
V	7.79
M 2	33.16
M 3	-83.62
M 4	2542.42
γ 1	- 0.44
γ 2	2.31

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	78.31	77.17	71.59	67.03
MAX.	81.5	83.7	81.4	72.6
MIN.	73.1	70.0	60.0	61.8
R	8.4	13.7	21.4	10.8
S ²	7.41	17.20	28.55	14.54
S	2.72	4.15	5.34	3.81
V	3.48	5.37	7.46	5.69

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	79.46	74.30	79.49	72.54	73.36	66.58	69.76	65.07
MAX	81.5	75.1	83.7	79.8	81.4	71.4	72.6	70.1
MIN.	75.9	73.1	75.9	70.0	65.6	60.0	65.8	61.8
R	5.6	2.0	7.8	9.8	15.8	11.4	6.8	8.3
S ²	3.14	0.78	5.58	7.91	21.99	14.51	8.40	10.38
S	1.77	0.98	2.36	2.81	4.69	3.81	2.90	3.22
V	2.23	1.19	2.97	3.88	6.39	5.72	4.16	4.95

TAB. 26: Carbono (Base Seca Libre de Cenizas), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	87.91
MAX.	91.01
MIN.	82.51
R	8.50
S ²	2.46
S	1.86
V	2.12
M 2	3.42
M 3	3.64
M 4	33.40
γ 1	0.57
γ 2	2.85

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	89.12	88.46	87.64	85.26
MAX.	91.01	90.76	90.70	87.21
MIN.	85.68	85.48	84.58	82.51
R	5.33	5.28	6.12	4.70
S ²	1.97	1.80	2.42	2.20
S	1.40	1.34	1.56	1.48
V	1.57	1.52	1.77	1.74

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	89.76	86.87	89.05	87.28	88.09	86.34	85.92	84.79
MAX	91.01	88.18	90.76	89.41	90.70	87.56	87.21	86.72
MIN.	88.99	85.68	86.60	85.48	85.19	84.58	84.67	82.51
R	2.02	2.50	4.16	3.93	5.51	2.98	2.54	4.21
S ²	0.33	1.08	0.93	1.55	2.09	1.23	1.47	2.41
S	0.58	1.04	0.96	1.24	1.45	1.11	1.21	1.55
V	0.64	1.20	1.08	1.43	1.64	1.28	1.41	1.83

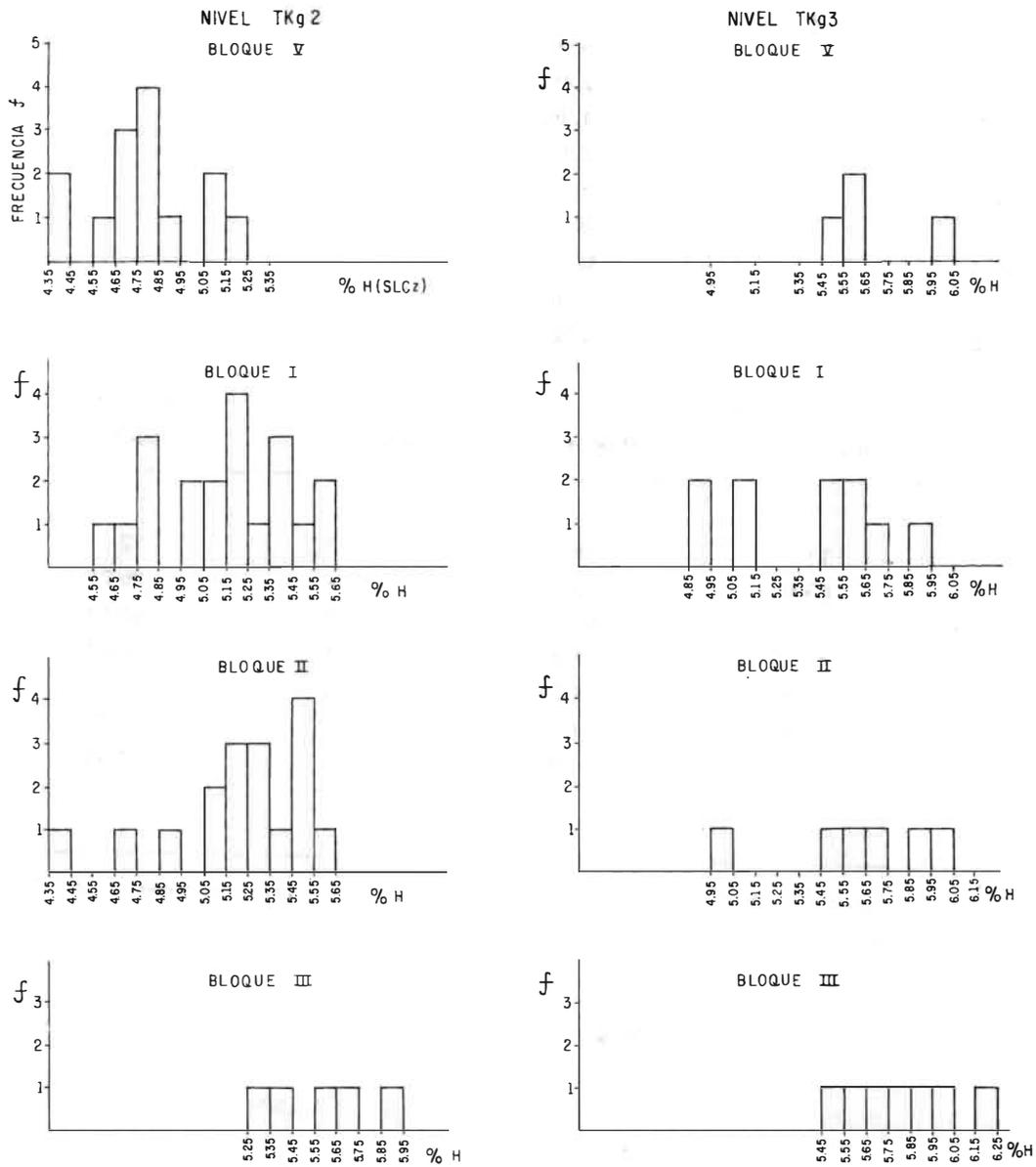


FIG. 21: Distribución del contenido de hidrógeno (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la zona Checuá - Languazaque.

TAB. 27: Hidrógeno (Base Seca Libre de Cenizas), Zona Checua - Lenguazaque.

n					83			
\bar{X}					5.27			
MAX.					6.24			
MIN.					4.37			
R					1.87			
S ²					0.172			
S					0.415			
V					7.86			
M 2					0.1699			
M 3					-9.574			
M 4					0.072			
γ 1					0.137			
γ 2					2.50			

	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
n	18		30		23		12	
\bar{X}	4.99		5.23		5.32		5.71	
MAX.	5.96		5.94		5.97		6.24	
MIN.	4.37		4.59		4.37		5.34	
R	1.59		1.35		1.60		0.90	
S ²	0.19		0.11		0.13		0.07	
S	0.44		0.33		0.37		0.26	
V	8.81		6.22		6.89		4.51	

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	14		4		20		10	
\bar{X}	4.80		5.67		5.15		5.37	
MAX.	5.21		5.96		5.57		5.94	
MIN.	4.37		5.49		4.59		4.86	
R	0.84		0.47		0.98		1.08	
S ²	0.06		0.04		0.08		0.13	
S	0.24		0.20		0.29		0.36	
V	5.06		3.57		5.60		6.71	

riaciones del contenido de hidrógeno modifican profundamente las propiedades del carbón, particularmente su comportamiento en la destilación destructiva y el rendimiento y naturaleza de los productos obtenidos. Las diferencias en el contenido de hidrógeno de muestras de carbón de un mismo manto, obedecen a las variaciones en las proporciones de los macerales presentes (FRANCIS, 1954).

Así, el tipo de carbón determina el rendimiento de alquitrán más que su rango, es decir, que la presencia de sustancias ricas en hidrógeno, tales como exinas de esporas, cutículas o resinas de los durenos o de esporas de los carbones "cannel", aumenta proporcionalmente el porcentaje de hidrógeno y los rendimientos de alquitrán.

Dentro de los intentos por relacionar el rendimiento de los productos obtenidos por carbonización, principalmente los rendimientos de alquitrán y aceites, con el análisis elemental del carbón, se tiene la siguiente fórmula (FRANCIS, 1969).

$$\text{Rendimiento de alquitrán y aceite a } 600^{\circ}\text{C} = (\text{H} - 3.5)^{1.5} \times 5.48\%$$

De lo cual se deduce que con los carbones de la zona Checua-Lenguazaque, bajo carbonificación a la temperatura anotada, se produciría desde 10% de alquitrán y aceite para los carbones del bloque V, hasta un rendimiento de 18% para los del Bloque III (valores promedio).

6.3.3. NITROGENO

La distribución de los valores de nitrógeno en la zona (Fig. 23), es de tipo leptocúrtica y sesgada a la izquierda como se indica por los correspondientes coeficientes dados en la Tabla 28. El contenido de nitrógeno oscila entre 1.63 y 2.12%, con un valor promedio de 1.88%.

Este elemento varía irregularmente en la zona estudiada, de forma tal que no se detecta ninguna tendencia de variación a

través de los bloques ni en los niveles, como se observa en las Figuras 24, 33 y 34.

Generalmente no se encuentran regularidades en el contenido de nitrógeno de combustibles del mismo tipo, aún ordenados según su edad u ocurrencia. Aunque, la composición del carbón dada en términos de carbono, hidrógeno y oxígeno, cambia a menudo bajo amplios límites, varía aún más para el nitrógeno. Estas desviaciones ocurren no sólo en carbones de una región definida o de cierta edad, sino también en aquellos de un mismo campo, manto, o aún sección transversal. Una posible explicación para las variaciones en el contenido de nitrógeno de muestras adyacentes, se encuentra en el análisis de los constituyentes morfológicos individuales (PEREZ, URIBE, VALDERRAMA, 1982).

Teniendo en cuenta que la cantidad de nitrógeno volátil liberado durante la coquización, varía inversamente con el rango del carbón (LOWRY, 1945), se espera que los carbones de la zona estudiada den bajo rendimiento de nitrógeno volátil.

En los cálculos de combustión y particularmente con el fin de determinar el peso y el volumen de los gases finales producidos, es necesario conocer las proporciones de nitrógeno presentes en el aire y en el carbón; el nitrógeno actúa como diluyente del oxígeno del aire, ya que es incombustible (FRANCIS, 1969).

6.3.4. OXIGENO

Se encuentra que este elemento varía en la zona bajo un amplio intervalo de valores, desde 2.03 hasta 7.63%, presentando un promedio de 4.27% en base como se analizó. La Figura 25 muestra la distribución de los resultados de oxígeno, la cual es ligeramente sesgada a la derecha y de apuntamiento relativo alto, como se deduce de la Tabla 29.

El contenido de oxígeno de un carbón es un índice importante de su rango, siendo más ricos en este elemento los de me-

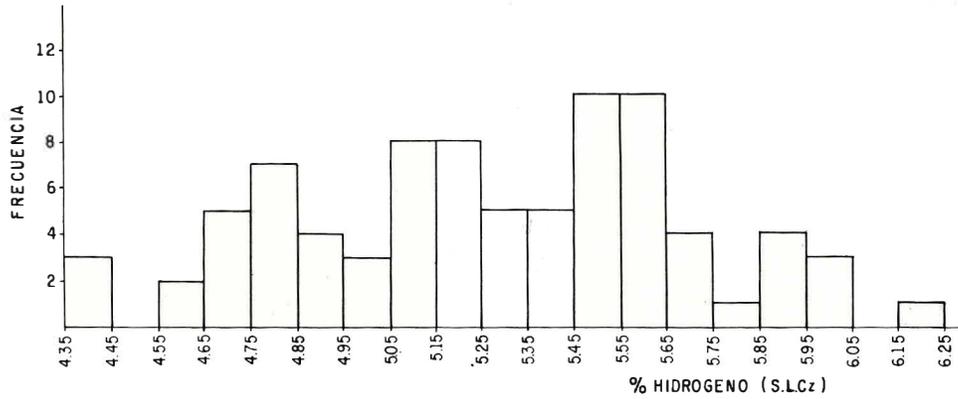


FIG. 22: Distribución general del contenido de hidrógeno (s.l.c.z.) en la Zona Checua Lenguaque.

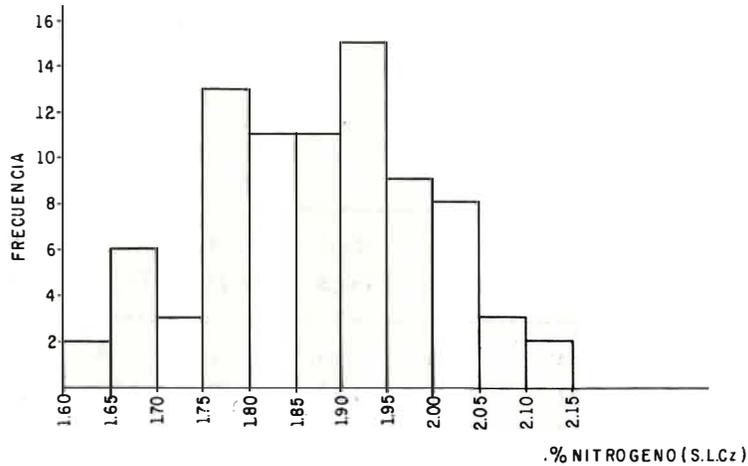


FIG. 23: Distribución general del contenido de nitrógeno (s.l.c.z.) en la Zona Checua Lenguaque.

TAB. 28: Nitrógeno (Base Seca Libre de Cenizas), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83							
\bar{X}	1.88							
MAX.	2.12							
MIN.	1.63							
R	0.49							
S ²	0.01							
S	0.12							
V	6.29							
M 2	0.014							
M 3	-1.90×10^{-4}							
M 4	4.50×10^{-4}							
$\gamma 1$	-0.12							
$\gamma 2$	2.40							
<hr/>								
	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
<hr/>								
n	18		30		23		12	
\bar{X}	1.93		1.87		1.84		1.90	
MAX.	2.12		2.05		2.12		2.01	
MIN.	1.66		1.65		1.63		1.70	
R	0.46		0.40		0.49		0.31	
S ²	0.02		0.01		0.02		0.01	
S	0.12		0.10		0.14		0.08	
V	6.44		5.19		7.59		4.40	
<hr/>								
	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel
	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3	TKg2	TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	1.89	2.07	1.88	1.86	1.83	1.87	1.89	1.91
MAX.	2.05	2.12	2.05	1.95	2.09	2.12	2.01	1.99
MIN.	1.66	2.00	1.65	1.77	1.63	1.66	1.70	1.85
R	0.39	0.12	0.40	0.18	0.46	0.46	0.31	0.14
S ²	0.01	25×10^{-3}	0.01	3.9×10^{-3}	0.02	0.02	0.02	2.4×10^{-5}
S	0.11	0.05	0.11	0.06	0.14	0.15	0.12	0.05
V	5.92	2.42	5.96	3.37	7.54	8.26	6.57	2.58
<hr/>								

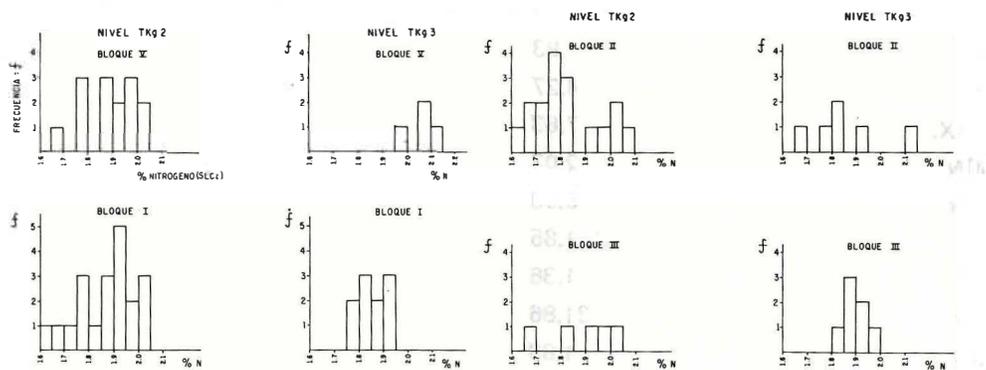


FIG. 24: Distribución del contenido de nitrógeno (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

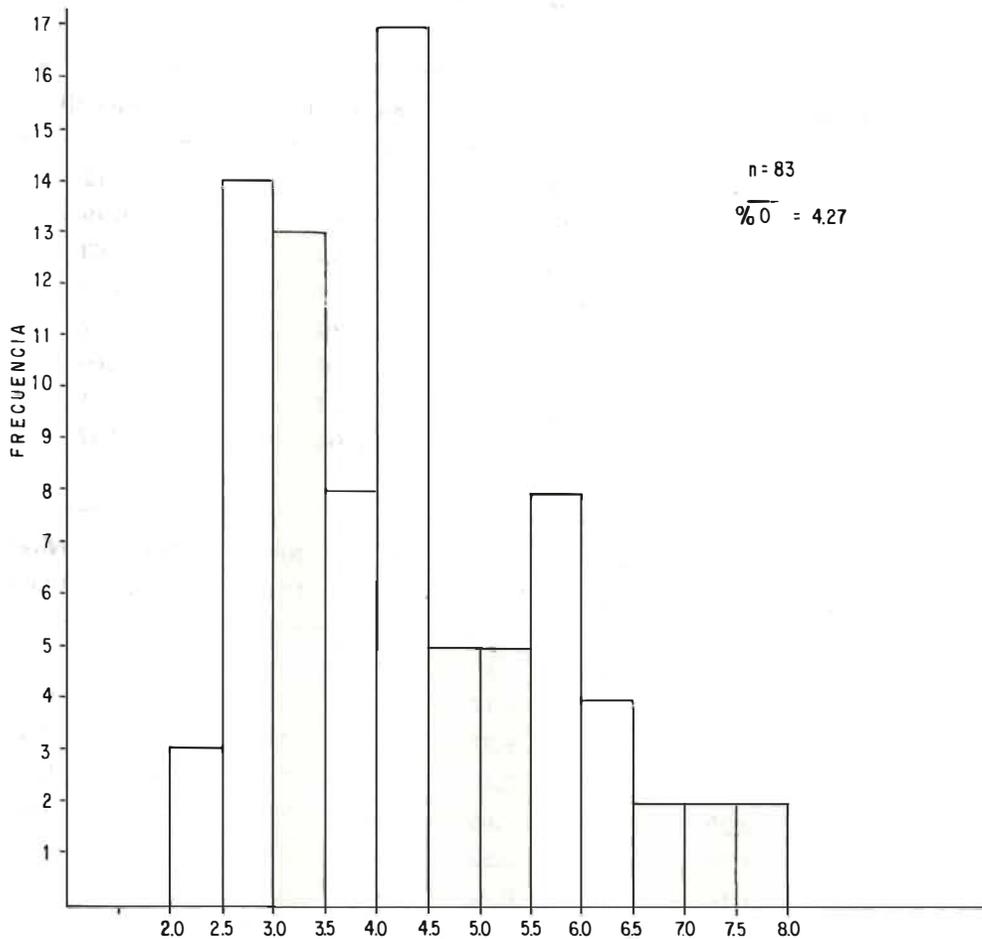


FIG. 25: Distribución de los valores de oxígeno - en base como se analizó en los carbones

TAB. 29: % Oxígeno (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	4.27
MAX.	7.63
MIN.	2.03
R	5.60
S ²	1.85
S	1.36
V	31.86
M 2	1.83
M 3	1.63
M 4	8.75
γ 1	0.66
γ 2	2.62

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	3.23	3.69	4.69	6.49
MAX.	4.32	5.62	7.03	7.63
MIN.	2.03	2.38	2.73	4.81
R	2.29	3.24	4.30	2.82
S ²	0.36	0.70	1.16	0.66
S	0.60	0.84	1.08	0.81
V	18.54	22.70	22.96	12.52

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	3.21	3.43	3.46	4.17	4.41	5.50	6.12	6.75
MAX.	4.09	4.32	5.62	5.37	6.23	7.03	7.63	7.60
MIN.	2.52	2.03	2.38	2.72	2.73	4.08	4.81	5.85
R	1.57	2.29	3.24	2.65	3.50	2.95	2.82	1.75
S ²	0.25	1.34	0.65	0.52	0.96	0.97	1.05	0.31
S	0.50	1.16	0.81	0.72	0.98	0.99	1.03	0.56
V	15.99	33.80	23.32	17.31	22.27	17.92	16.77	8.28

nor rango que los de rangos superiores. El notable y progresivo aumento de oxígeno desde el Bloque V hacia el Bloque III, demuestra la disminución de rango en el sentido norte-sur del sinclinal; también el mayor contenido de oxígeno de los carbones del nivel TKg3 corrobora que éstos son de menor rango que los del nivel TKg2 (Tabla 29 y Figura 26).

Es conocido el efecto de la oxidación de los carbones sobre su poder coquizante, pero es necesario hacer notar que con la medida de oxígeno no se detectan las modificaciones producidas mientras que otras propiedades tales como la temperatura de fusión, el hinchamiento y la plasticidad, son afectados de manera importante.

Una fijación de 0.1% de oxígeno es suficiente para disminuir la plasticidad en forma apreciable. Una oxidación más fuerte que correspondería a la reacción con aproximadamente 1% de oxígeno, reduce enormemente las propiedades coquizantes y en ciertos casos las suprime completamente. La zona de plasticidad se disminuye y se comienza a anotar una reducción en el rendimiento de alquitranes (LOISON, et al, 1970).

Como regla general, la tendencia a la oxidación es mayor a menor rango del carbón. Giorgiadis y Gaillard encontraron que la velocidad de oxidación es principalmente una función del contenido de oxígeno del carbón y aumenta con él, lo cual no es contradictorio, porque en general el contenido de oxígeno aumenta a medida que se disminuye en rango (LOWRY, 1963). Con estas consideraciones, se concluye que en los carbones de la zona estudiada, la facilidad de oxidación aumenta en el sentido norte-sur del sinclinal.

6.3.5. AZUFRE

Se encuentra que el contenido de azufre varía entre 0.44 y 2.40% (base seca); los valores obtenidos presentan una distribución de sesgo positivo y de tipo leptocúrtica, como se indica en la Figura 27 y la Tabla 30, indicando que la mayoría de los

carbones de la zona tienen bajo contenido de azufre; en efecto, el valor más común es de 0.5 - 0.6%.

Como se observa en la Figura 28, no hay variación regular del azufre a través de los diferentes bloques. El azufre puede variar de manto a manto y aún dentro del mismo manto bajo áreas pequeñas (LOWRY, 1945). Sin embargo, para todos los bloques, el nivel TKg3 presenta mayor contenido de este elemento que el TKg2, como se deduce de los valores promedio presentados en la Tabla 30; lo cual indica que el porcentaje de azufre disminuye con la profundidad relativa (estratigráfica).

El azufre, segundo en importancia como impureza después de las cenizas, es perjudicial en carbones térmicos y en combustibles domésticos, debido a la acción corrosiva de sus productos de combustión, tales como cenizas de sulfatos, trióxido de azufre y dióxido de azufre; este último es el principal efluente.

El nivel de azufre contenido en el carbón tiene un efecto sobre la resistividad de las cenizas volantes que escapan de la caldera y pasan a la chimenea para ser colectadas por los precipitadores electrostáticos. Si el nivel de azufre es bajo, entonces la resistividad de la ceniza será alta y la eficiencia en su correlación por el precipitador será baja; esto originará un problema ambiental. Es por causa de esta pérdida en la recolección de partículas, que algunos fabricantes de equipos creen que el nivel mínimo de azufre en el carbón debería ser de 0.35%, aunque otros indican que se originarán problemas a cualquier nivel inferior al 1%. Los precipitadores mencionados anteriormente son los más comúnmente utilizados. Bajo las condiciones anotadas se encuentra que todos los carbones de la zona en estudio, cumplen el requerimiento de contenido mínimo de azufre, ya que todos los valores encontrados son superiores a 0.40%.

El nivel máximo de azufre que puede aceptarse en una caldera, a menudo depende de la legislación local sobre emisiones. La

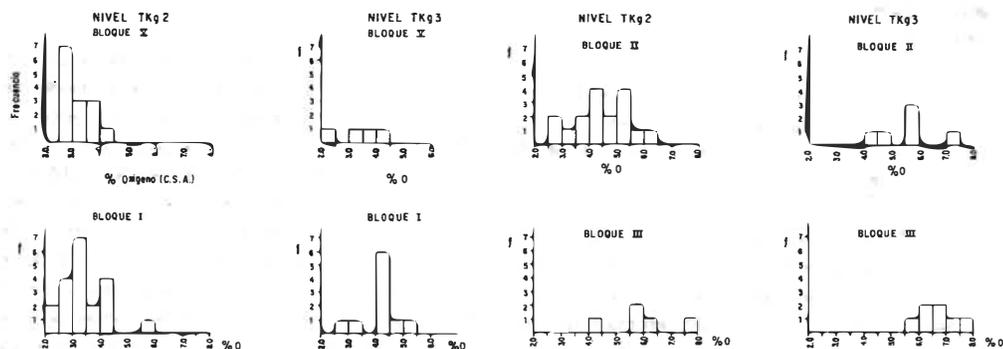


FIG. 26: Distribución de los valores de oxígeno (Base como se analizó) en los diferentes bloques y niveles de la zona Checuá - Lenguazaque.

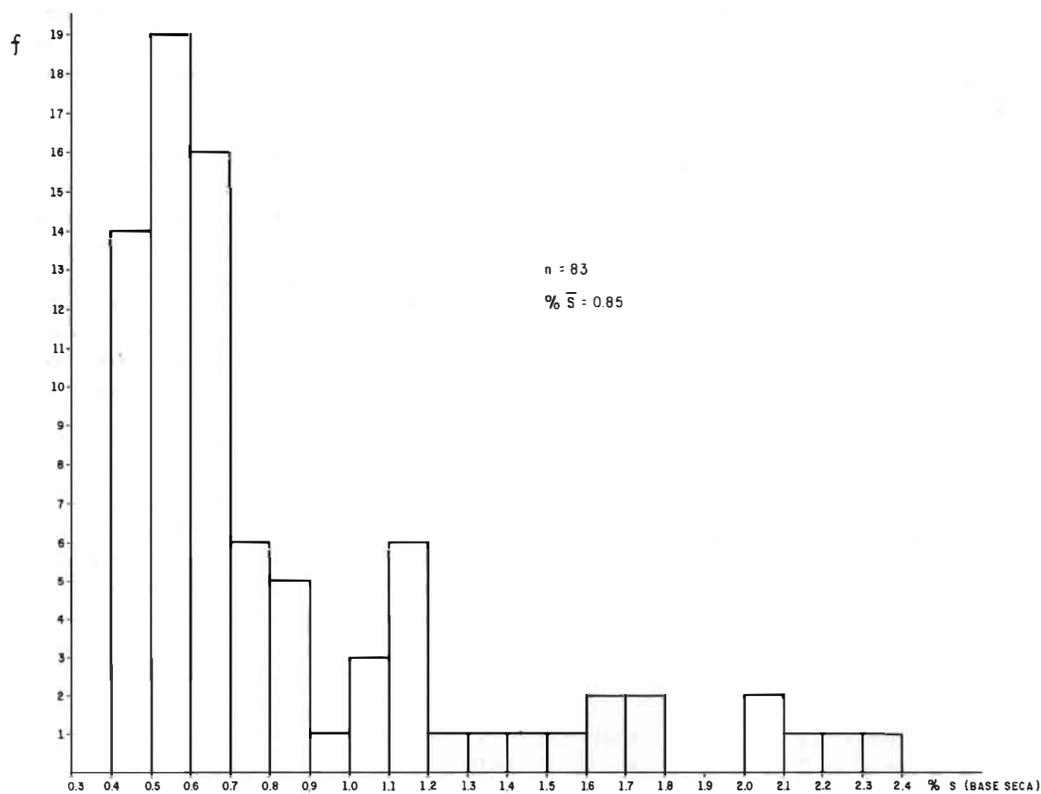


FIG. 27: Distribución del contenido de azufre (Base seca) en las muestras de la Zona Checuá - Lenguazaque.

TAB. 30: Azufre (Base Seca), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	0.85
MAX.	2.40
MIN.	0.44
R	1.96
S ²	0.23
S	0.48
V	56.42
M 2	0.23
M 3	0.18
M 4	0.26
γ 1	1.69
γ 2	5.07

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	0.89	0.86	0.71	1.02
MAX.	2.40	2.15	1.25	2.07
MIN.	0.46	0.44	0.47	0.48
R	1.94	1.71	0.78	1.59
S ²	0.38	0.24	0.05	0.31
S	0.62	0.49	0.23	0.55
V	69.57	56.98	32.00	54.37

	Nivel TKg2	Nivel TKg3						
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	0.60	1.88	0.61	1.37	0.64	0.91	0.80	1.17
MAX.	1.11	2.40	1.09	2.15	1.19	1.25	1.35	2.07
MIN.	0.46	1.13	0.44	0.77	0.47	0.65	0.48	0.54
R	0.65	1.27	0.65	1.38	0.72	0.60	0.87	1.53
S ²	0.02	0.37	0.03	0.29	0.04	0.04	0.17	0.38
S	0.16	0.61	0.18	0.54	0.20	0.21	0.41	0.62
V	25.87	32.49	28.71	39.17	30.65	22.94	50.86	52.90

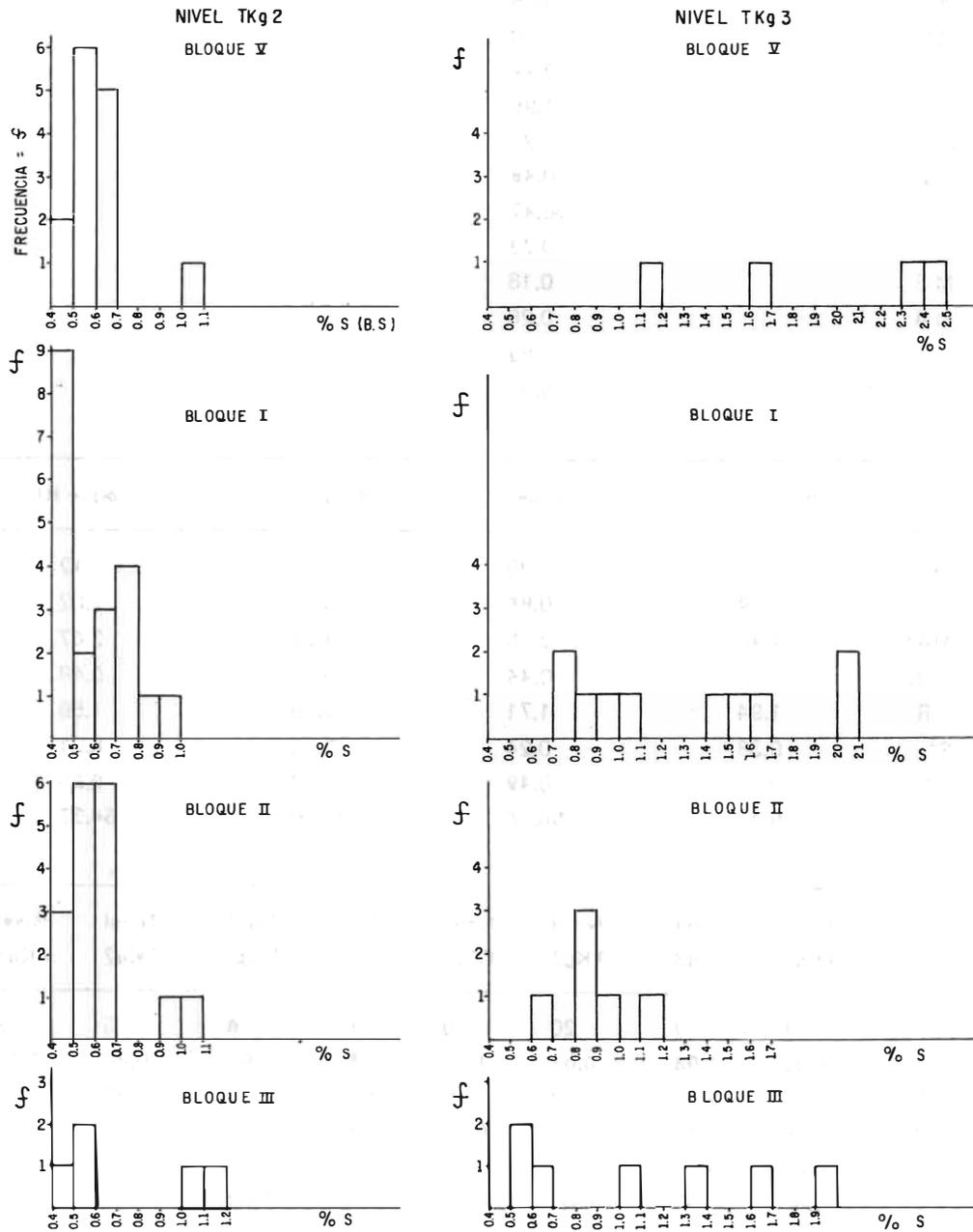


FIG. 28: Distribución del contenido de azufre (Base seca) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

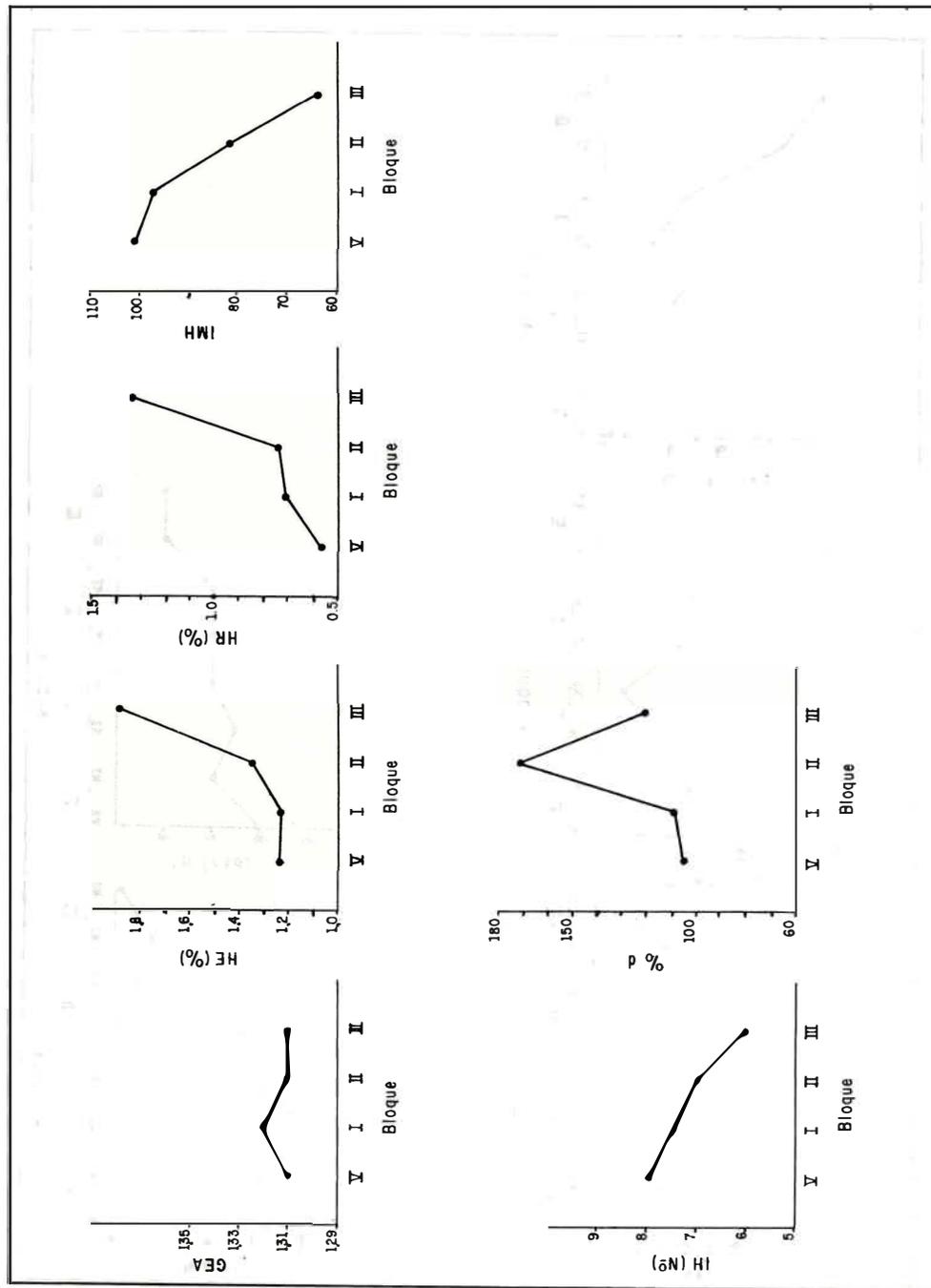


FIG. 29: Variación del promedio de algunos parámetros, en base como se analizó, en los bloques de la Zona Checua Lenguazaque.

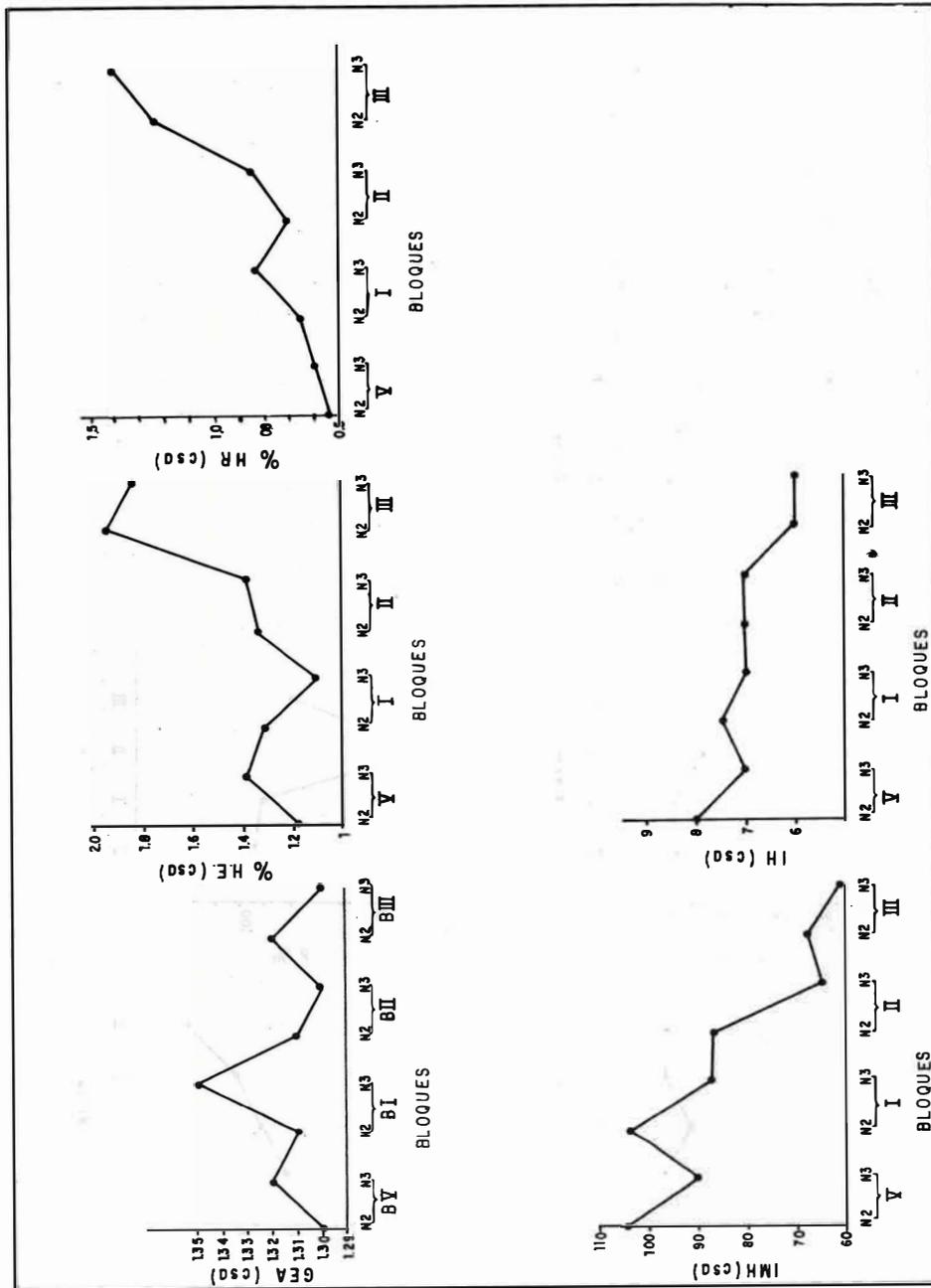


FIG. 30: Variación promedio de algunos parámetros en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguazaque.

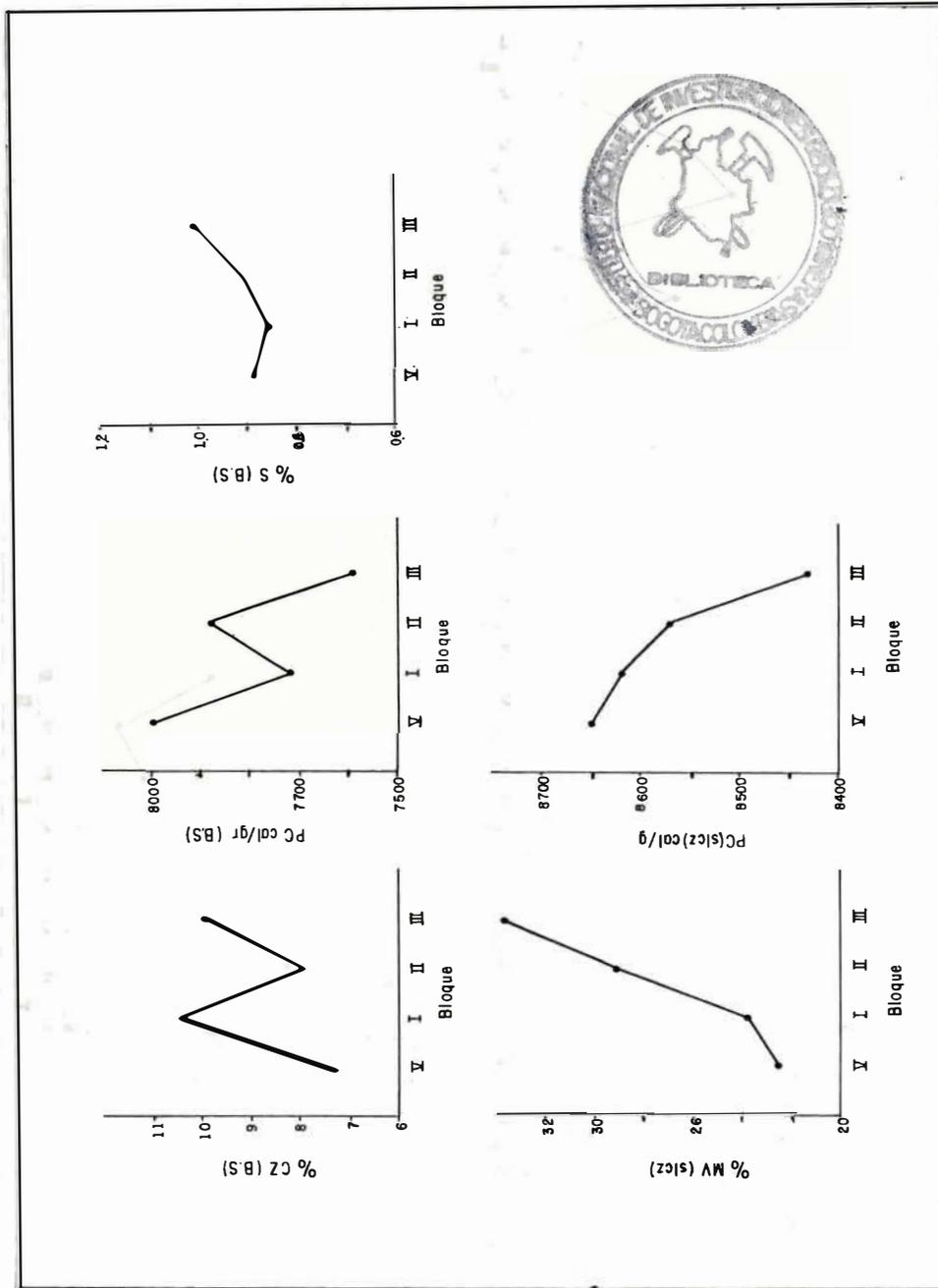


FIG. 31: Variación del promedio de algunos parámetros, en base seca (s.l.cz) en los bloques de la zona Checua - Lenguaque.

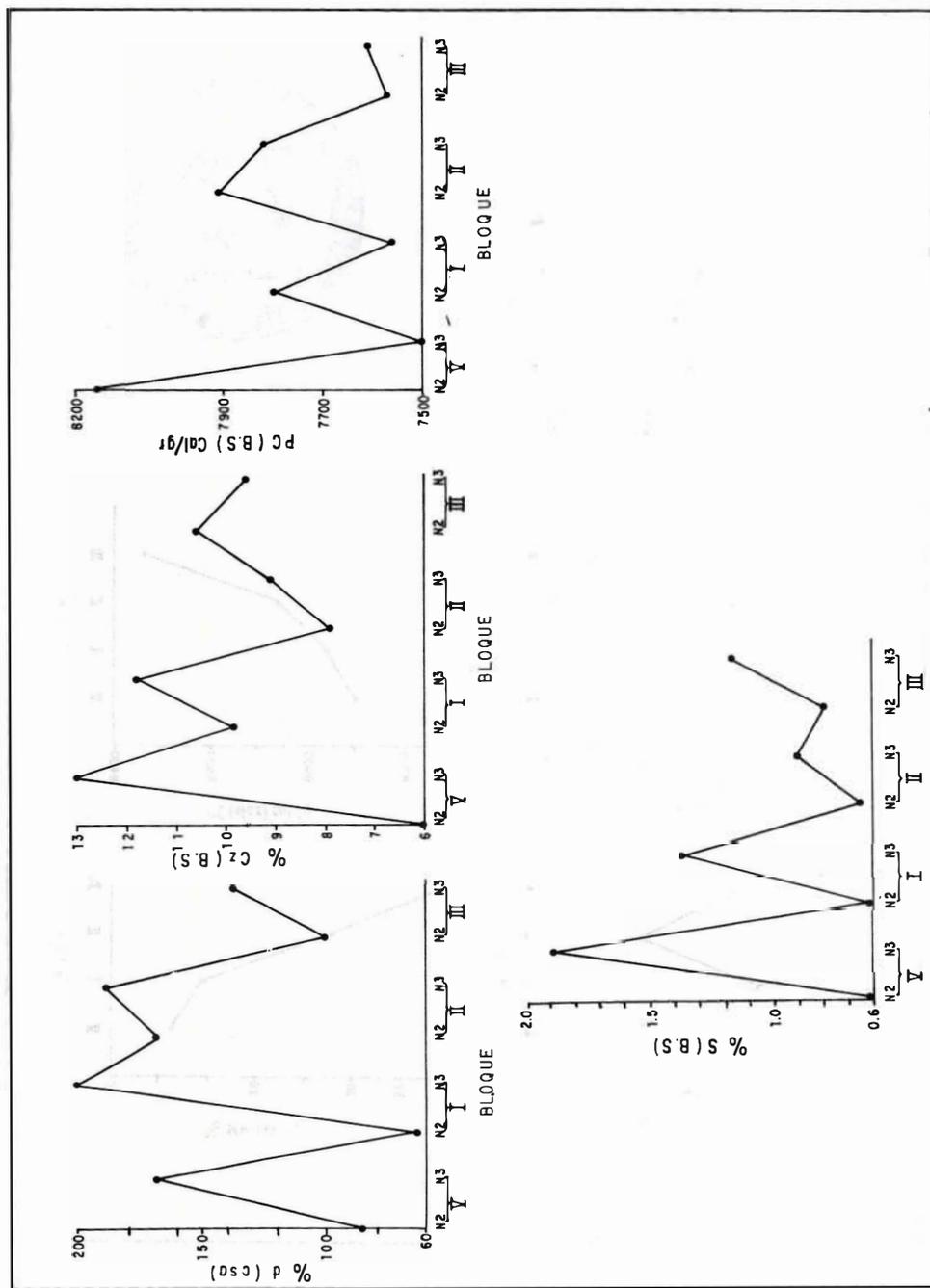


FIG. 32: Variación del promedio de algunos parámetros en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

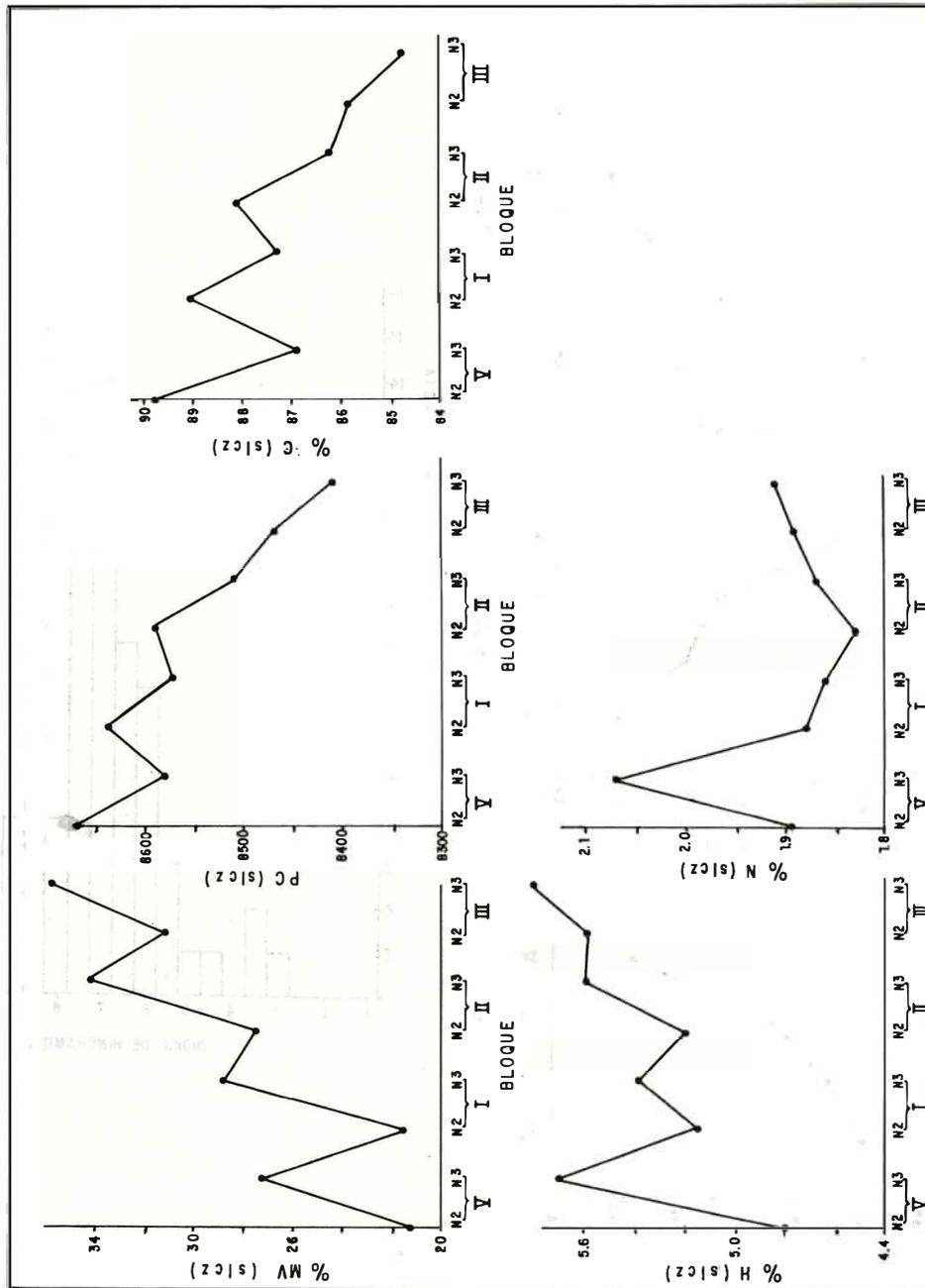


FIG. 33: Variación del promedio de algunos parámetros, en base seca (l.s.cz.) en los diferentes niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

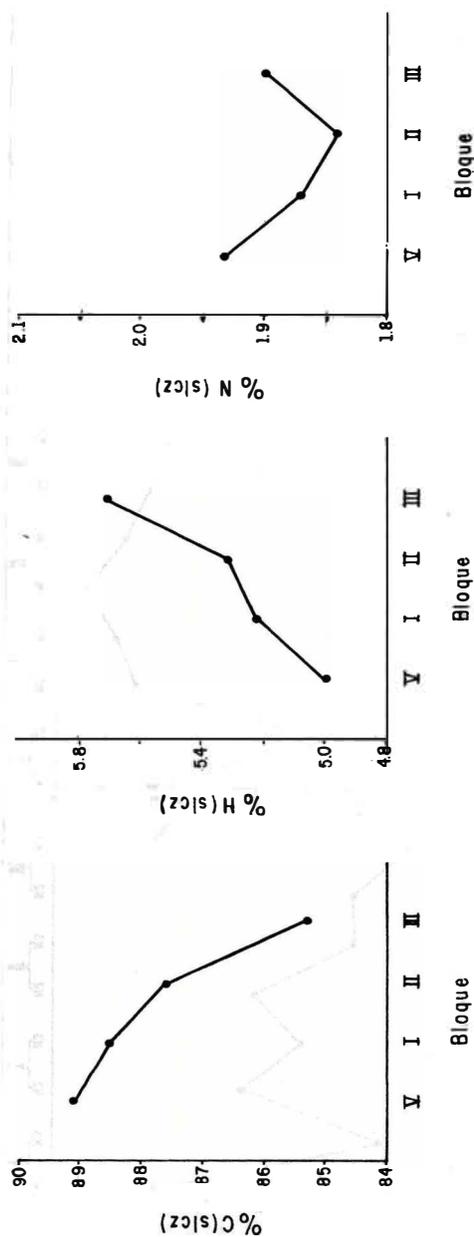


FIG. 34: Variación del promedio de algunos parámetros (b.s.l.cz), en los bloques de la Zona Checua - Lenguaque.

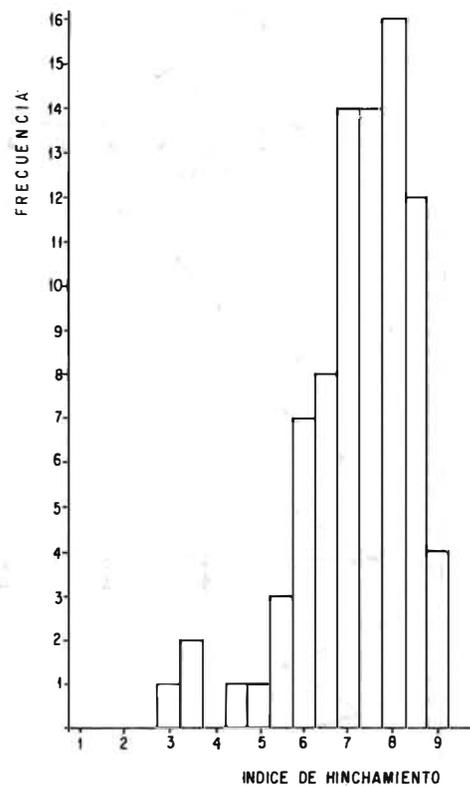


FIG. 35: Distribución general del índice de hinchamiento en las muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

capacidad de una planta de sulfuración, si es adaptable a la caldera, determinará también el nivel máximo permisible de azufre contenido en el carbón (McBRIDE, 1981).

El azufre presenta su principal desventaja como constituyente de combustibles metalúrgicos. Para operaciones de alto horno se imponen penalidades por el alto contenido de azufre en el coque porque se aumenta el volumen de escoria, implica mayor consumo de coque como también mayor dificultad para controlar el horno (LOWRY 1945).

Durante la carbonización, parte del azufre del carbón pasa a los productos gaseosos, otra parte a los productos líquidos y el resto queda en el coque.

La atmósfera presente durante la carbonización tiene gran influencia sobre las proporciones de azufre volatilizadas. En general, el hidrógeno y los gases que contienen hidrógeno tienden a aumentar la cantidad de azufre liberado.

La distribución en estos productos es de gran importancia comercial, como lo refleja el hecho de que las especificaciones ASTM fijan el máximo contenido de azufre permitido para el coque y el gas, y no directamente para el carbón. Así, la norma ASTM para carbón coquizante determina que su composición deberá ser tal que el coque de fundición no contenga más de 1.0% de azufre, y el coque del alto horno tenga menos de 1.3% de azufre (valores en base seca). (LOWRY, 1945).

Igualmente la norma colombiana ICONTEC 1675, establece los siguientes límites máximos de azufre permitidos, en el coque metalúrgico: 0.7% para coque grado 89 y 1.0% para los de grado 86, 84 y 82 (ICONTEC, 1981).

El 73% de los carbones estudiados tienen bajo contenido de azufre (menor de 1.0%), lo cual como se ha mencionado es una característica deseable y frecuentemente

esencial, en el caso de utilizar el coque obtenido de estos carbones para fines siderúrgicos. Siendo éste uno de los principales usos del carbón y debido a que los carbones con bajo azufre son limitados, hay un gran incentivo para utilizar también los carbones altos en azufre. La aplicación de métodos de lavado a carbones susceptibles de reducir su contenido de azufre, tiene gran importancia comercial como es bien conocido y está estrechamente relacionada con las diferentes formas de azufre presentes; este hecho se analiza particularmente para los carbones de la zona estudiada, en el Capítulo 9.

6.4. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES PLASTICAS Y DE HINCHAMIENTO

Con el fin de evaluar las propiedades coquizantes de los carbones bajo análisis se realizaron dos pruebas también utilizadas en la clasificación internacional: el índice de hinchamiento y el análisis dilatométrico.

6.4.1. INDICE DE HINCHAMIENTO

Los carbones del área estudiada presentan en general índices de hinchamiento altos, que varían de 3 hasta 9, como se observa en las Tablas 19 a 21. La Figura 35 muestra la distribución de este parámetro en la zona, indicando que el valor más común es 8, y que son muy escasos los índices inferiores a 5, como era de esperarse, ya que la mayoría de los carbones con materias volátiles entre 21 y 32%, tienen un índice muy cercano al valor máximo (LOWRY, 1963).

Los histogramas presentados por bloques y niveles (Figura 36) muestran una ligera tendencia a disminuir del Bloque V hacia el III; hecho algo más evidente al comparar los promedios obtenidos para cada bloque en la Tabla 31.

Los índices de hinchamiento menores en la zona, corresponden a las muestras 151359, 151362 con $I.H = 3\frac{1}{2}$ y 151358 con $I.H = 3$. Como se indicó en el Capítulo 2, las dos primeras provienen de un frente minero abandonado y de un sitio de pinchamiento, respectivamente, y la última per-

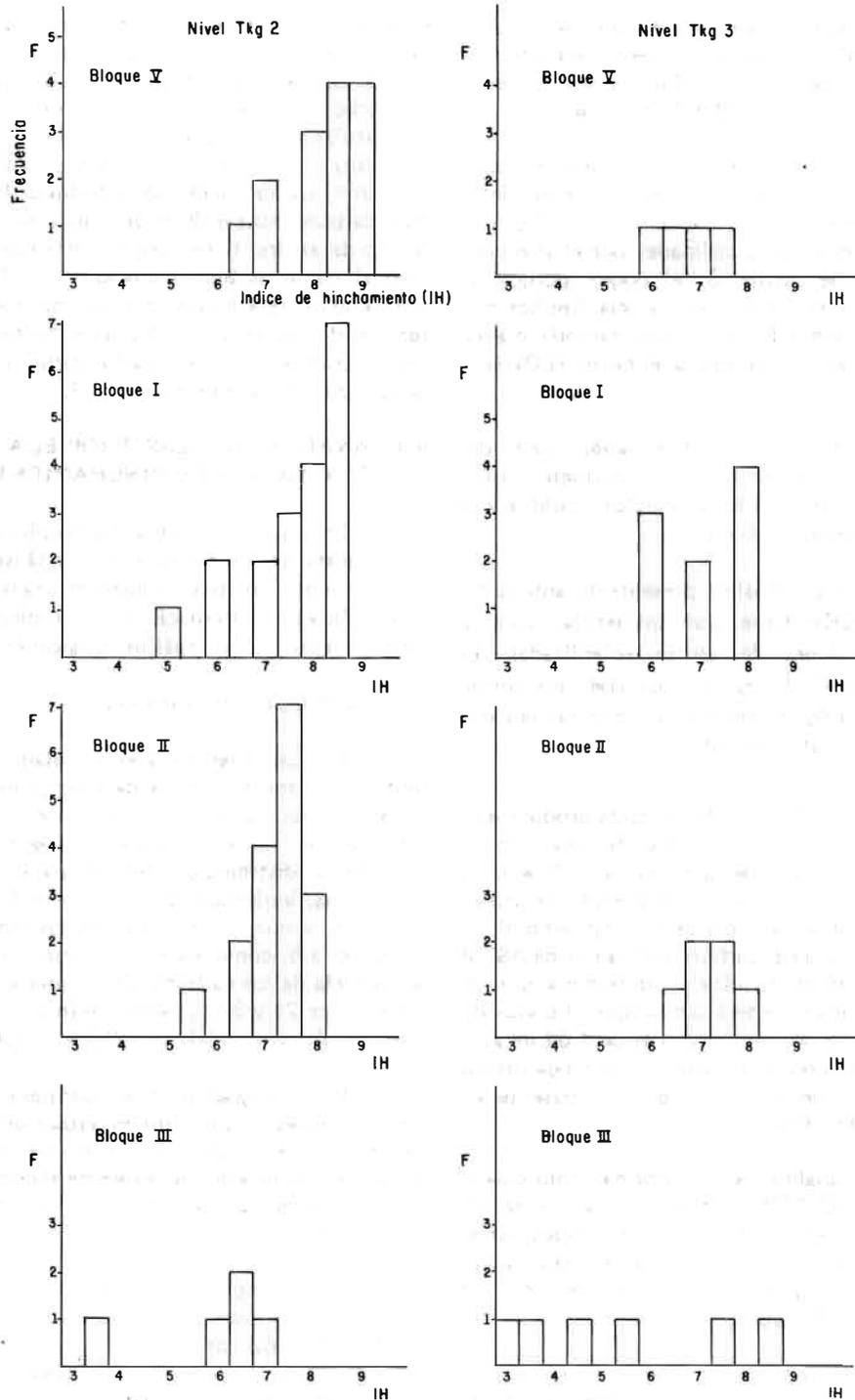


FIG. 36: Distribución del índice de hinchamiento en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

TAB. 31: Índice de hinchamiento, Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	7
MAX.	9
MIN.	3
R	6
S ²	1.5
S	1.2
V	17.1
M 2	1.5
M 3	2.2
M 4	10.8
γ 1	1.2
γ 2	4.8

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	8	7 ^{1/2}	7	6
MAX.	9	8 ^{1/2}	8	8 ^{1/2}
MIN.	6	5	5 ^{1/2}	3
R	3	3 ^{1/2}	2 ^{1/2}	5 ^{1/2}
S ²	1.0	1.1	0.4	3.4
S	1.0	1.1	0.6	1.8
V	12.5	14.2	8.3	31.7

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	8	7	7 ^{1/2}	7	7	7	6	6
MAX.	9	7 ^{1/2}	8 ^{1/2}	8	8	8	7	8 ^{1/2}
MIN.	6 ^{1/2}	6	5	6	5 ^{1/2}	6 ^{1/2}	3 ^{1/2}	3
R	2 ^{1/2}	1 ^{1/2}	3 ^{1/2}	2	2 ^{1/2}	1 ^{1/2}	3 ^{1/2}	4 ^{1/2}
S ²	0.7	0.4	1.2	0.8	0.4	0.3	1.9	5.0
S	0.8	0.6	1.1	0.9	0.6	0.5	1.4	2.2
V	10.1	9.6	14.7	12.7	8.8	7.2	23.5	38.6

tenece a un manto que presenta varias intercalaciones arcillosas y se trata posiblemente de una muestra oxidada. De estas consideraciones se deduce que los bajos valores de hinchamiento obedecen a los efectos de la alteración sufrida por estos carbones.

Selving y Ode han investigado la relación existente entre el índice de hinchamiento y el comportamiento del carbón en la práctica. Demostrando que el índice de hinchamiento tiene valor, como medida del hinchamiento libre y de las propiedades coquizantes de los carbones, cuando el calentamiento se hace por capas combustibles.

Sin embargo, este parámetro no es una medida del comportamiento del carbón durante la coquización.

Kreulen hace extensiva esta afirmación, indicando que en hornos de coque de tipo semejante se obtenía un buen coque con un carbón de índice de hinchamiento 5,5 - 6, y un coque de calidad francamente inferior con un carbón de índice de hinchamiento 7,5. Además, ha observado que durante la oxidación de ciertos tipos de carbones el índice de hinchamiento inicialmente aumenta, pasa a través de un máximo y decrece después. Esto ocurre mientras otras propiedades, tales como el índice del poder aglutinante B.S., el índice Roga y la curva del dilatómetro, acusan un decrecimiento importante de las propiedades coquizantes.

Esta manera de comportarse el índice de hinchamiento aminora su valor intrínseco. En opinión de Kreulen, falla completamente para la evaluación de las propiedades coquizantes de un carbón, y por tanto, también como índice de clasificación (KREULEN, 1952).

El índice de hinchamiento permite catalogar rápidamente los carbones que tienen propiedades coquizantes medianas pero casi no hace distinción entre los buenos carbones para coque (LOISEN, et al., 1970).

6.4.2. ANALISIS DILATOMETRICO

Para el estudio de los fenómenos que ocurren durante la formación del coque, se efectúa el ensayo dilatométrico. Sus resultados están estrechamente relacionados con los obtenidos durante la coquización del carbón en la práctica, que constituye una rutina general en muchas coquerías (KREULEN, 1952).

Los ensayos fueron realizados en un dilatómetro sistema Chevenard - Joumier Tipo Dic-7; la preparación de la muestra (tamaño de partícula), preparación del lápiz de carbón y velocidad de calentamiento (3°C/min.), fueron efectuados conforme a las especificaciones dadas por la Norma ISO-349-1975E; de igual manera los resultados dados en las tablas 19, 20 y 21 se presentan de acuerdo con lo establecido en la misma norma.

Las propiedades plásticas del carbón se ven perjudicialmente afectadas por la oxidación; los efectos de ésta varían mucho de un carbón a otro y dependen de la naturaleza del carbón.

En general la oxidación causa un aumento en la temperatura de ablandamiento y una disminución en la temperatura de resolidificación, siendo el cambio de esta última menor que el de la primera. El rango plástico puede llegar a cero por una intensa oxidación. Al mismo tiempo, disminuyen la fluidez y el hinchamiento. Se ha encontrado en ciertos casos que una leve oxidación aumenta el hinchamiento medido, bien sea en el dilatómetro o en la prueba de hinchamiento libre en crisol. Esto es debido probablemente a una reducción de la fluidez. En cualquier caso una oxidación fuerte conlleva una reducción en el hinchamiento.

6.4.2.1. *Discusión del análisis dilatométrico por mantos.*

- En las figuras 37 a 46 se presentan las curvas dilatométricas para los carbones de los Bloques V, I, II y III, respectivamente, reagrupadas por mantos en los casos donde se cuenta con dos o más muestras del mismo manto. Se analizan, en este caso particular, conjuntamente los Bloques

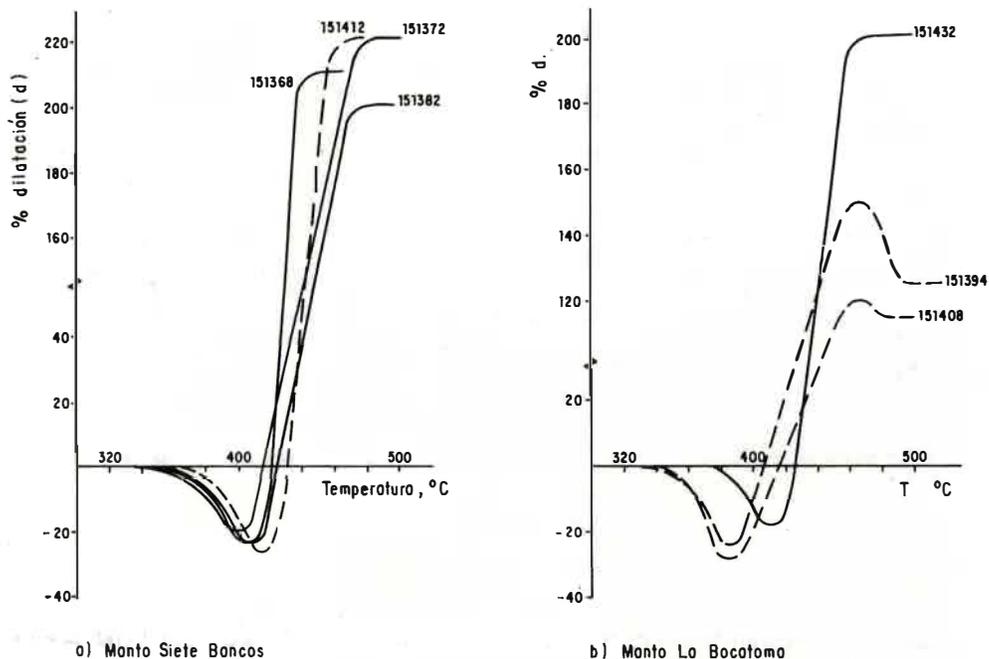


FIG. 37: Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguaque.

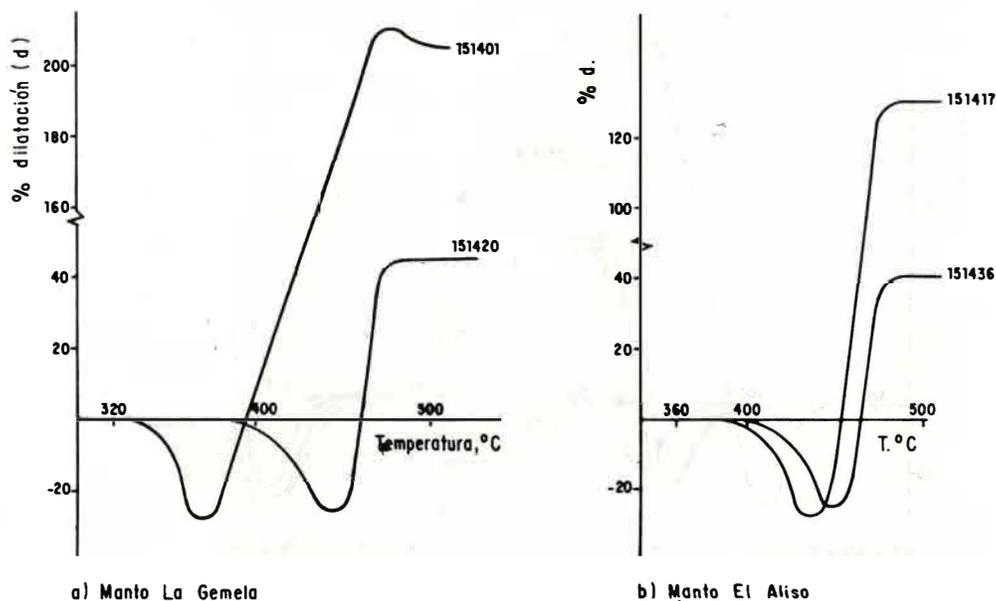


FIG. 38: Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua - Lenguaque.

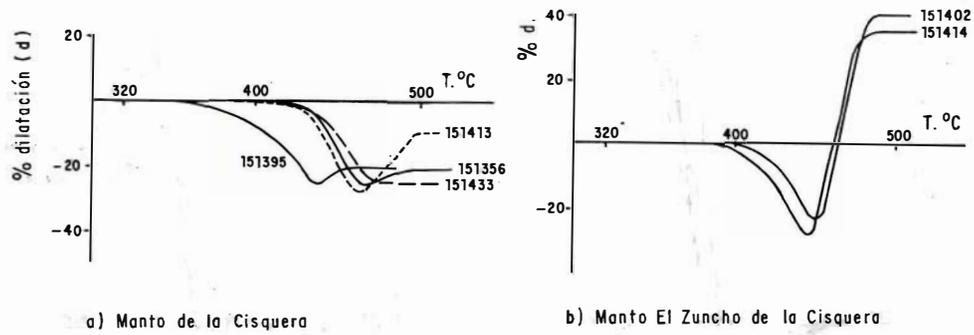


FIG. 39: Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua-Lenguazaque.

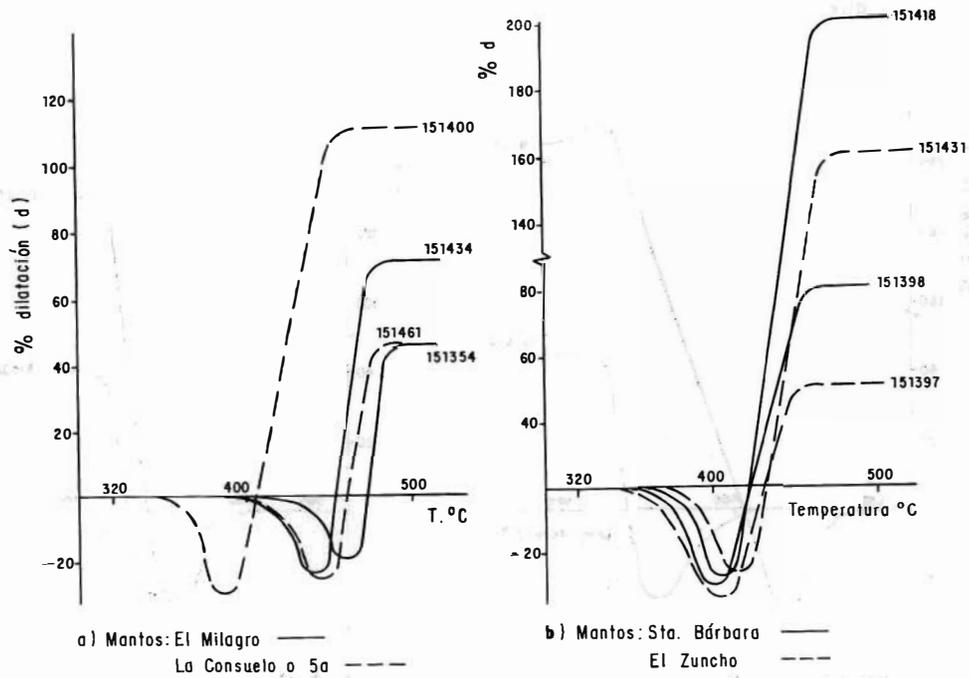


FIG. 40: Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua-Lenguazaque.

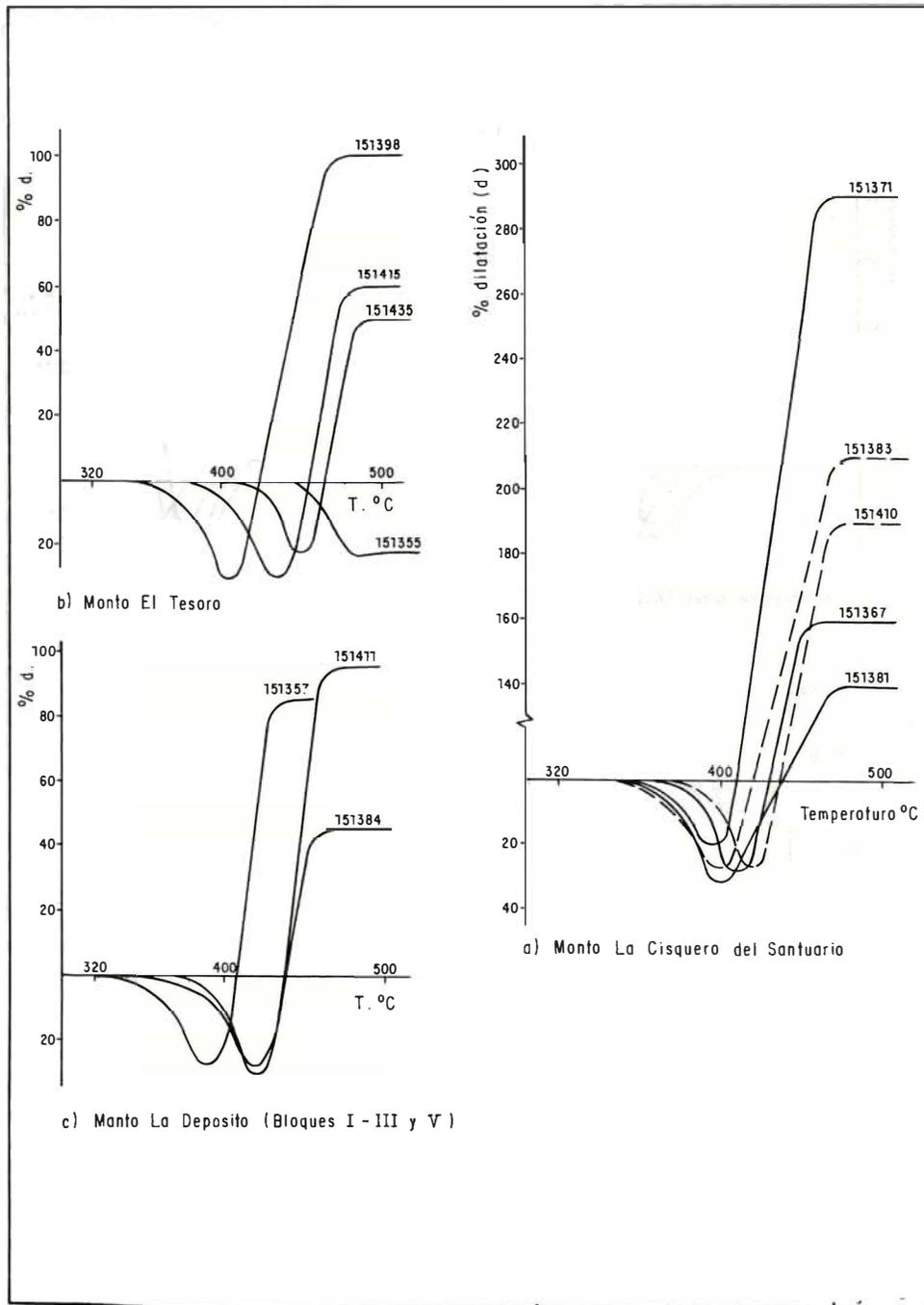


FIG. 41: Curvas dilatométricas de muestras de los bloques I y V Zona Checua-Lenguazaque.

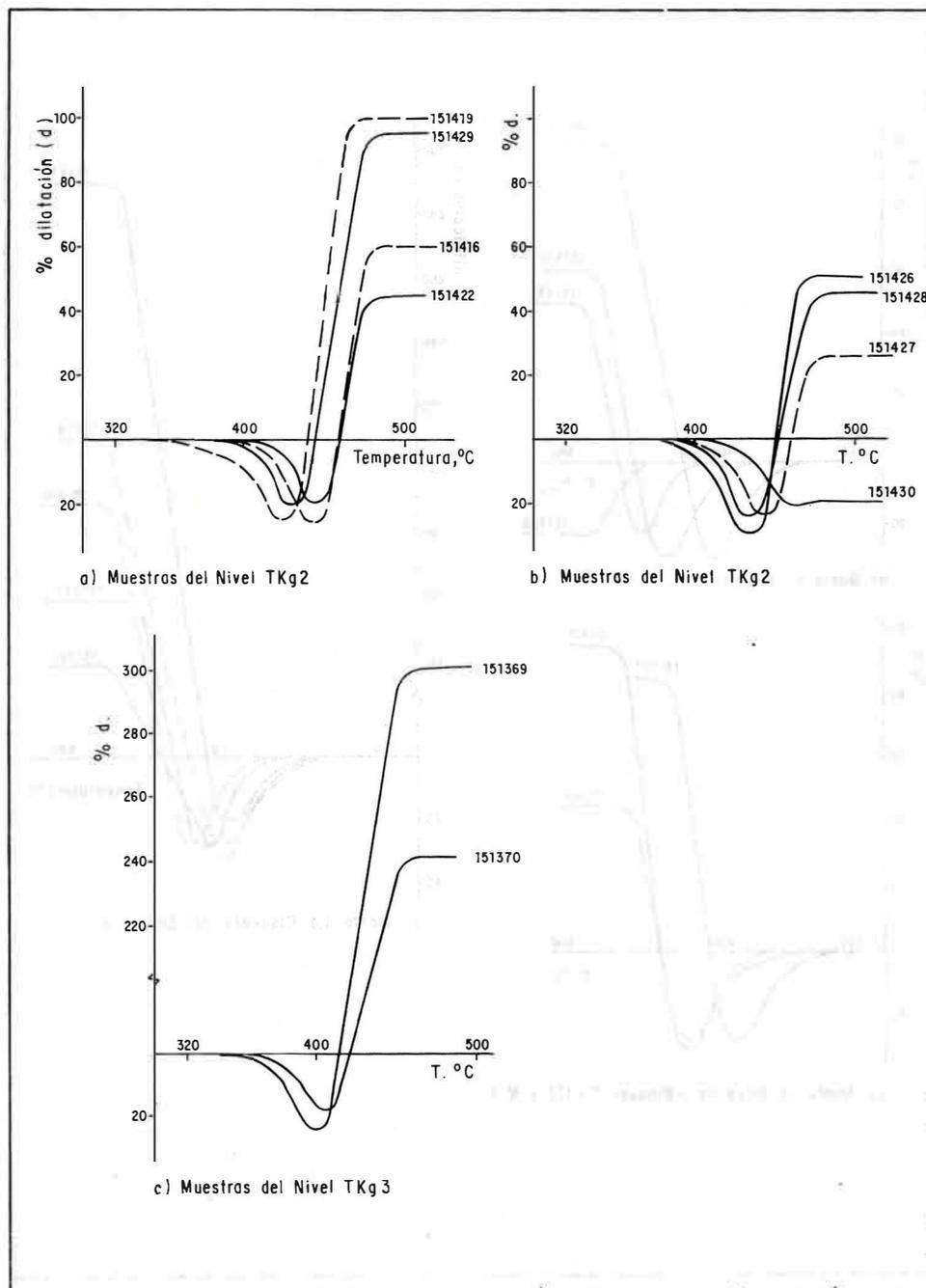


FIG. 42: Curvas dilatométricas de muestras del Bloque I Zona Checua - Lenguazaque.

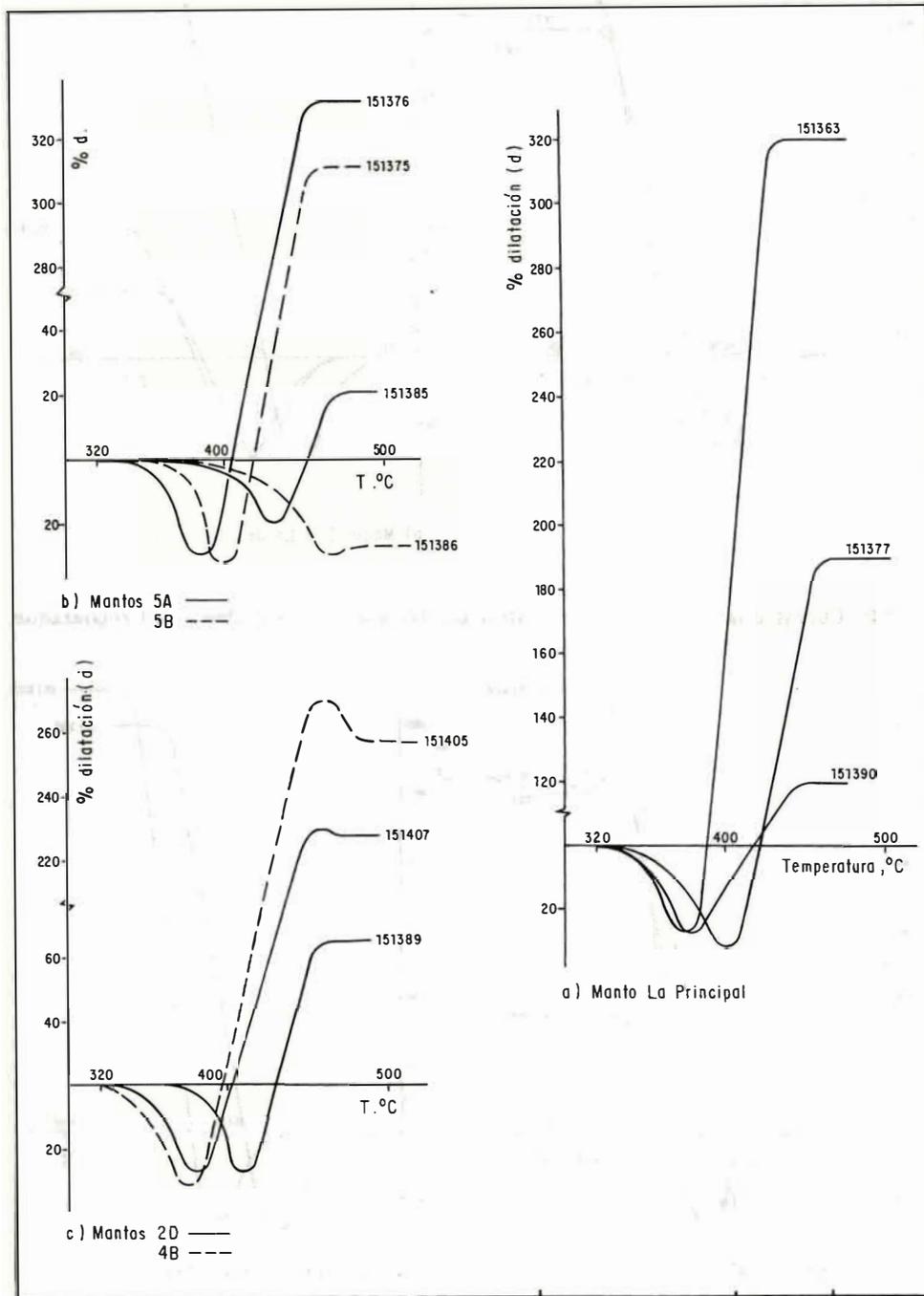


FIG. 43: Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua - Lenguaque.

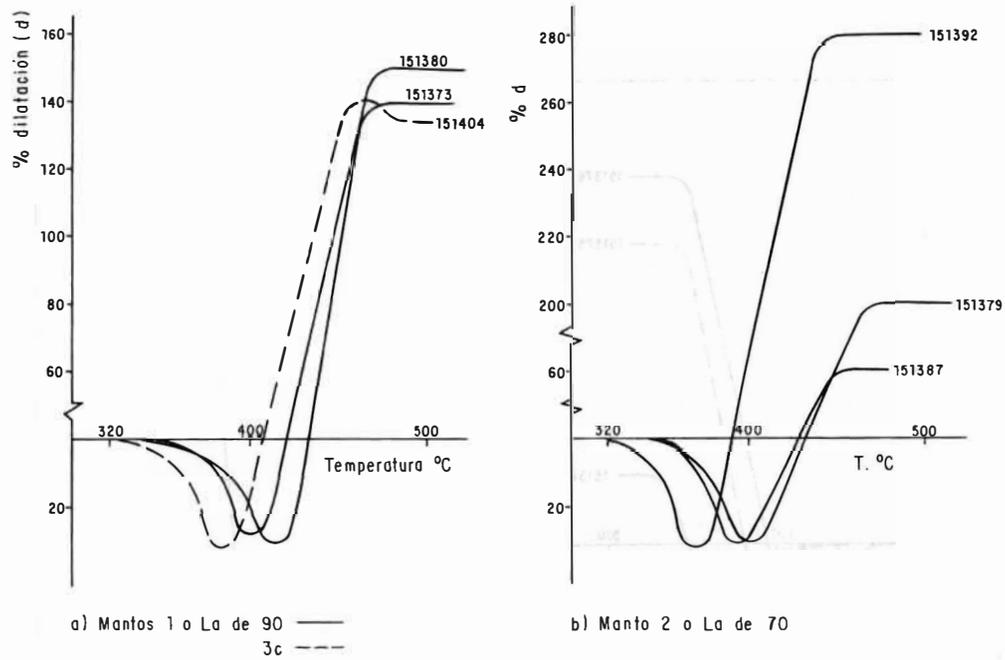


FIG. 44: Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua - Lenguaque.

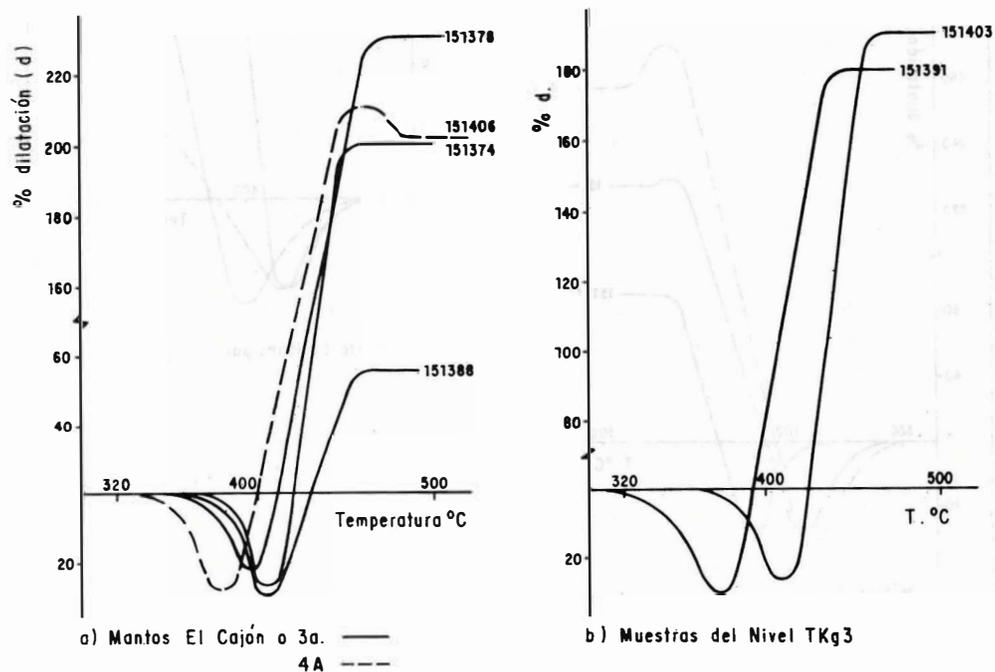


FIG. 45: Curvas dilatométricas de muestras del bloque II Zona Checua - Lenguaque.

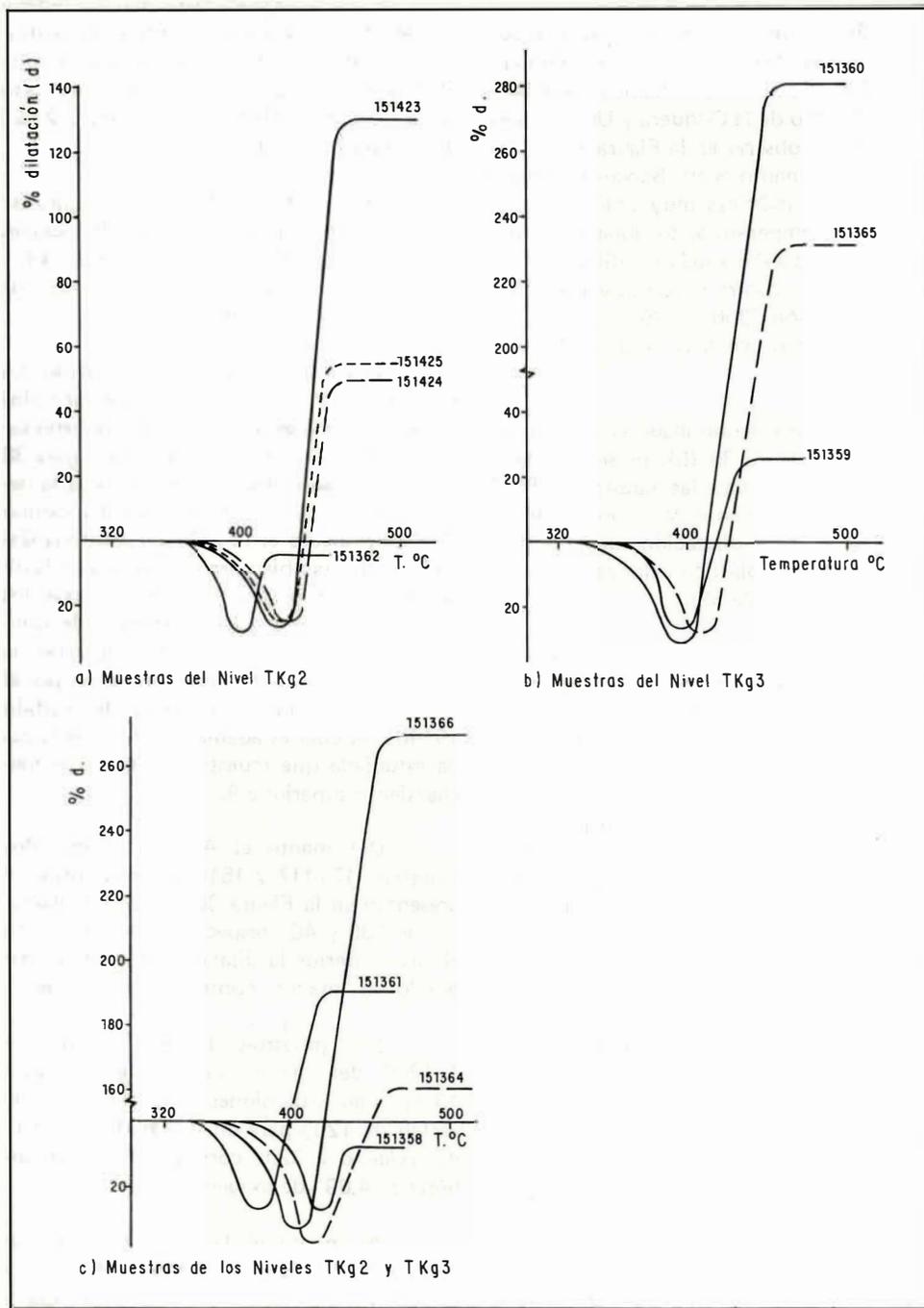


FIG. 46: Curvas dilatómetricas de muestras del bloque III Zona Checua - Lenguaque.

V y I, debido a que se presume que existe una correlación o continuidad de mantos entre ellos.

Se encuentran algunos mantos con características dilatométricas muy homogéneas; tal es el caso de los mantos Siete Bancos, El Zuncho de la Cisquera y Uno (o la de 90). Como se observa en la Figura 37 (a), los carbones del manto Siete Bancos presentan características plásticas muy uniformes, dadas por las temperaturas de ablandamiento, máxima contracción y máxima dilatación, similares para las cuatro muestras y altos valores de dilatación (200 a 220%) a pesar del alto contenido de cenizas (11.8 a 16.5% en b.c. s.a.).

El manto denominado el Zuncho de la Cisquera, Figura 39 (b), presenta dilataciones de 40 y 35% para las muestras 151402 y 151414 respectivamente, y como era de esperarse de la baja dilatación, dan también valores de rango plástico relativamente bajos, 80 y 85°C (Tabla 32).

La Figura 44 (a) muestra características dilatométricas similares para las muestras 151373 y 151380 del manto Uno o la de 90, con dilataciones de 140 y 150% respectivamente.

Para los carbones de un mismo manto se observa que la dilatación es más alta a mayor contenido de materias volátiles; los mantos El Milagro, Santa Bárbara, El Zuncho, 2 D y la Bocatoma demuestran esta afirmación.

En la Figura 40 (a) se presenta la dilatometría de las muestras 151354 y 151434 del manto El Milagro; la dilatación aumenta de 45 a 70% con una variación de 17.4 a 19.5% en materias volátiles.

Los carbones de los mantos Santa Bárbara y el Zuncho presentan dilataciones de 80 a 200% y 50 a 160% respectivamente, como se observa en la Figura 40 (b); en ambos mantos, las muestras de mayor dilatación tienen un contenido de volátiles superior.

Para las muestras 151389 y 151407 del manto 2 D, Figura 43 (c), se obtienen dilataciones de 65 y 230% respectivamente. A pesar de que la segunda tiene mayor contenido de cenizas y oxígeno, presenta la dilatación más alta, lo cual puede nuevamente atribuirse al significativamente más alto porcentaje de volátiles, 29.6% contra 21.6% de la muestra 151389.

Del manto La Bocatoma, Figura 37 (b) se tienen tres muestras con dilataciones de 120, 150 y 200%, volátiles de 22.8, 24.6 y 25.1%, respectivamente, y contenidos de oxígeno del mismo orden entre sí.

Los mantos La Gemela, El Aliso, La Principal y El Tesoro, representan ejemplos de la influencia del contenido de oxígeno sobre la dilatación. Se observa en la Figura 38 (a) un marcado desplazamiento hacia la derecha de la curva dilatométrica del carbón 151420 respecto al 151401 del manto la Gemela, como también gran diferencia en la dilatación, 210 contra 45%; puesto que los contenidos de materias volátiles y de cenizas son similares para las dos muestras, la diferencia presentada puede explicarse por el menor porcentaje de oxígeno del carbón 151401, el cual es además el único de la zona estudiada que muestra un índice de hinchamiento superior a 9.

Del manto el Aliso se tienen dos muestras, 151417 y 151436 cuyas curvas se presentan en la Figura 38 (b), con dilataciones de 130 y 40% respectivamente; como en el caso anterior la dilatación menor corresponde al mayor contenido de oxígeno.

Las muestras 151363, 151377 y 151390 del manto La Principal, Figura 43 (a), dan expansiones al dilatómetro, que varían de 120% para un contenido de 5.56% de oxígeno a 320% correspondiente al carbón con 4.89% de oxígeno.

Al manto el Tesoro pertenecen las muestras 151355, 151396, 151415 y 151415, cuyas curvas dilatométricas aparecen en la Figura 41 (b); se concluye del valor de dilatación negativo, la temperatura de

ablandamiento significativamente más alta y el menor rango plástico de todos los carbones de la zona, presentados por la 151355, que se trata de un carbón oxidado; éste, muestra además mayor porcentaje de oxígeno respecto a los otros del manto. Algunas veces aunque el contenido de oxígeno no pone en evidencia el estado de alteración, sí lo hacen los análisis dilatométricos. Tal es el caso del manto La Cisquera, del cual se tomaron cuatro muestras de carbones, Figura 39 (a), con oxígeno entre 2.84 y 4.40%. La muestra 151433 presenta sólo contracción, y las otras (151356, 151395 y 151413) dan dilatación negativa. Como se deduce de las Tablas 19, 21 y 32, estos carbones tienen alta temperatura de ablandamiento y de los menores rangos plásticos de toda la zona; estas características son indicativas de que han sufrido oxidación; este manto no es coquizante, aunque sí presenta propiedades de hinchamiento (I.H entre 6 y 7).

Los carbones de algunos de los mantos muestreados, presentan características químicas y dilatométricas tan diferentes entre sí, que inducen a suponer que no pertenecen al mismo manto, o bien, que se presentan variaciones excepcionalmente altas en la horizontal; desafortunadamente no se cuenta en este estudio con suficientes elementos de juicio que permitan definir entre estas dos alternativas. Se describen a continuación los casos de este tipo detectados en el estudio.

La Figura 43 (b) representa la dilatación para los mantos 5A y 5B; como se observa, de cada manto se tienen dos muestras que difieren bastante entre sí. La 151385 con una dilatación de 20% contra 330% de la 151376 del mismo manto, e igualmente se observa una temperatura de ablandamiento mucho mayor para la primera; estos resultados podrían indicar que se trata de un carbón oxidado lo cual es contradictorio con el menor contenido de oxígeno. Con las muestras del manto 5B se presenta un hecho similar; así para 151375 se obtiene una expansión de 310% muy diferente a la dada por la muestra 151386 (-28%)

y no concordante con lo esperado del análisis de oxígeno.

Con las muestras 151374, 151378 y 151388 del manto El Cajón o Tercera, (Figura 45 (a)) se obtienen dilataciones altas para las dos primeras (200 y 230%) contra 55% de la última. Se observa además que la composición química varía ampliamente; así el contenido de volátiles es de 28.6, 26.5 y 19.9% y el oxígeno adquiere valores de 5.22, 4.17 y 3.58% respectivamente.

Del manto Dos o la de 70 se muestrearon los carbones 151379, 151387 y 151392 cuyas curvas dilatométricas aparecen en la Figura 44 (b), éstos presentan 200, 40 y 280% de dilatación, respectivamente. La muestra 151387 con un contenido de oxígeno significativamente más bajo y contenido de cenizas algo menor, corresponde sin embargo a la menor dilatación; esto sumado a la gran diferencia en el contenido de volátiles, conlleva a suponer que ésta no pertenece al mismo manto, o como se había anotado, que se presenta una gran variación en composición dentro del manto.

6.4.2.2. *Discusión de los resultados de dilatación según bloques y niveles.*

Siguiendo la metodología de discusión de los demás parámetros, se analizan a continuación las características dilatométricas presentadas por los diferentes bloques y niveles.

La Tabla 33 muestra los resultados del tratamiento estadístico de los valores de dilatación; se excluye la muestra 151433 ya que ésta presenta sólo contracción. Como se observa, esta medida varía ampliamente en la zona estudiada, asumiendo valores desde -28% hasta 330%. El promedio obtenido para la zona es de 128% y el valor más común está entre 40 y 60% (Figura 47). La distribución de los valores encontrados muestra un apuntamiento relativo alto y presenta un ligero sesgo hacia la derecha.

A través de los diferentes bloques no se detecta ninguna tendencia de variación en la dilatación, mientras que en los niveles, se encuentra sistemáticamente un promedio de

TAB. 32: Rango plástico presentado por los carbones de la Zona Checua - Lenguaque*

Muestra No.	No. de Campo	Rango Plástico °C	Muestra No.	No. de Campo	Rango Plástico °C
IGM	GBS		IGM	GBS	
BLOQUE I NIVEL TKg2			BLOQUE II NIVEL TKg3		
151354	1	85	151363	10	110
151355	2	50	151377	24	130
151356	3	70	151390	37	125
151413	60	85	151391	38	130
151414	61	85	151393	40	120
151415	62	100	151403	50	110
151416	63	90	BLOQUE III NIVEL TKg2		
151417	64	95	151362	9	55
151418	65	100	151366	13	115
151419	66	115	151423	70	110
151420	67	95	151424	71	90
151421	68	90	151425	72	100
151422	69	90	BLOQUE III NIVEL TKg3		
151426	73	95	151357	4	110
151427	74	90	151358	5	65
151428	75	90	151359	6	80
151429	76	95	151360	7	130
151430	77	85	151361	8	85
151431	78	105	151364	11	110
151432	79	100	151365	12	115
BLOQUE I NIVEL TKg3			BLOQUE V NIVEL TKg2		
151367	14	95	151394	41	130
151368	15	100	151395	42	90
151369	16	115	151396	43	120
151370	17	105	151397	44	110
151371	18	120	151398	45	110
151372	19	150	151399	46	125
151381	28	130	151400	47	115
151382	29	135	151401	48	140
151383	30	140	151402	49	80
151384	31	120	151408	55	125
BLOQUE II NIVEL TKg2			151433	80	
151373	20	135	151434	81	90
151374	21	105	151435	82	75
151375	22	115	151436	83	85
151376	23	125	BLOQUE V NIVEL TKg3		
151378	25	125	151409	56	130
151379	26	130	151410	57	100
151380	27	130	151411	58	95
151385	32	150	151412	59	100
151386	33	120			
151387	34	105			
151388	35	100			
151389	36	100			
151392	39	135			
151404	51	130			
151405	52	135			
151406	53	125			
151407	54	130			

* Dado por la diferencia entre la temperatura de máxima dilatación y la de ablandamiento.

TAB. 33: Porcentaje de dilatación, d (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.

n	82
\bar{X}	128
MAX.	330
MIN.	-28
R	348
S ²	9003.99
S	94.89
V	74.79
M 2	8805.27
M 3	1.97 x 10 ⁵
M 4	1.62 x 10 ⁸
γ 1	0.24
γ 2	2.09

	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
n	18		30		23		12	
\bar{X}	106		109		174		122	
MAX.	220		290		330		280	
MIN.	-21		-22		-28		-8	
R	241		312		358		288	
S ²	4409.1		8995.2		9334.6		10740.3	
S	66.4		94.8		96.6		103.6	
V	62.9		86.7		55.7		85.1	

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	13	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	86	169	63	202	168	188	100	137
MAX.	210	220	200	290	330	320	270	280
MIN.	-21	95	-22	45	28	120	-5	-8
R	231	125	222	245	358	200	275	288
S ²	3426.7	2839.6	4432.4	5500.3	11131.7	5096.7	11337.5	11451.3
S	58.5	53.3	66.6	74.2	105.5	71.4	106.5	107.0
V	68.0	31.6	105.0	36.8	62.7	37.9	106.5	77.9

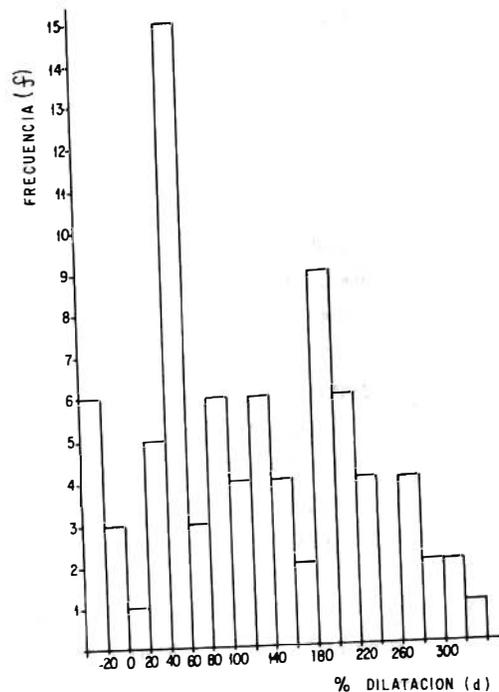


FIG. 47: Distribución general del porcentaje de dilatación en las muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

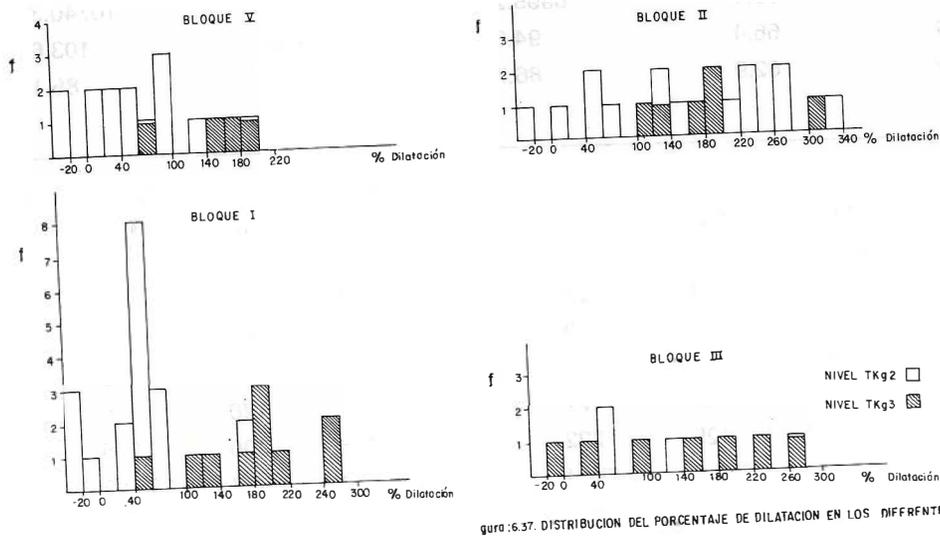


FIG. 48: Distribución del porcentaje de dilatación en los diferentes bloques y niveles de las muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

dilatación mayor para el TKg3 que para el TKg2 (Figuras 32 y 48), a tal punto que, el 70% de los carbones en el nivel TKg3, produce excesiva dilatación y en el TKg2 sólo el 25% dan más de 150% de dilatación.

El 35% de las muestras de la zona se consideran como carbones conquizantes óptimos, teniendo en cuenta que presentan de 50 a 150% de dilatación, aunque también las muestras de gran expansión después de la fusión, dan por regla general un coque aglomerado satisfactorio (LQWRY, 1945); el 40% de los carbones estudiados tienen dilatación mayor de 150%.

Los carbones más hinchables comprendidos dentro del campo de coquización satisfactorio, pueden producir coques poco resistentes, con la formación de grietas o pueden crear una presión suficiente durante el proceso de hinchamiento para deteriorar las paredes del horno de coque. Estos efectos adversos se vencen por mezclados con carbones o productos de carbón no hinchables, tales como antracita, carbón de vapor o polvo de coque (FRANCIS, 1969); el excesivo hinchamiento puede también reducirse mediante la oxidación deliberada bajo condiciones reguladas de temperatura y tiempo, hasta llevar las propiedades plásticas al nivel deseado (LOWRY, 1963).

Los carbones parcialmente fundidos con expansión débil, tienen un valor coquizante dudoso (LOWRY, 1945); 12 de las 83 muestras caen en ésta categoría, ya que presentan dilatación menor de 50%.

Exceptuando los carbones 151430 y 151386, los demás que dan dilatación negativa o aún expanden bajo las condiciones del ensayo (como la 151433), presentan otros indicios de alteración tales como, bajo rango plástico, bajo índice de hinchamiento, altos contenidos de oxígeno y de azufre sulfato. El estado de meteorización de ellos, no permite determinar si los respectivos carbones originales (no alterados), son o no aptos para propósitos metalúrgicos. En el caso del carbón 151430, se atribuye la dilatación nega-

tiva al alto contenido de materia mineral (el mayor de toda la zona), pues se observa que mediante lavado mejora notablemente sus características plásticas. Mientras que el 151386, requiere de estudios petrográficos, con el fin de determinar la causa de su dilatación negativa.

Como se observa en las Figuras 37 a 45, algunas curvas presentan un segundo descenso después de alcanzar la máxima altura; esto indica hundimiento del pistón, atribuido a la excesiva fluidez de la masa en el proceso de hinchamiento (URIBE, 1982).

Las Tablas 34, 35 y 36 muestran el análisis estadístico para las temperaturas de ablandamiento, de máxima contracción y de máxima dilatación respectivamente.

Se encuentra que, para los carbones estudiados, la temperatura de ablandamiento (T_1) varía entre 315 y 450°C, la de máxima contracción (T_2) entre 370 y 485°C y la de máxima dilatación (T_3) desde 420 hasta 500°C.

Como se deduce de los valores estadísticos de rango, desviación y coeficiente de variación de las citadas tablas, T_1 varía en un intervalo de valores más amplios que T_2 y ésta a su vez presenta mayor dispersión que T_3 , lo cual puede atribuirse, al menos parcialmente, al hecho de que la medida de la temperatura de ablandamiento es la menos precisa, pues el trazado de la porción horizontal de la curva dilatométrica implica en algunos casos cierta subjetividad, particularmente cuando presenta un ligero ascenso o descenso, hecho demostrado por la menor repetibilidad obtenida para esta medida.

Por otra parte, la temperatura de máxima dilatación, muestra mayor dependencia del rango del carbón, lo cual contribuye a la menor dispersión de los valores para T_3 .

Si bien se observa que los carbones del norte del sinclinal (Bloques V y I) presentan valores mayores para las temperaturas características que los del sur (Bloques

TAB. 34: Temperatura de ablandamiento T_1 (Base como se analizó), Zona Checua-Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	361
MAX.	450
MIN.	315
R	135
S^2	788.19
S	28.07
V	7.77
M 2	778.69
M 3	15350.58
M 4	1.89×10^6
$\gamma 1$	0.71
$\gamma 2$	3.12

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	367	378	339	354
MAX.	415	450	365	375
MIN.	330	335	315	330
R	85	115	50	45
S^2	759.5	783.3	234.0	217.4
S	27.6	28.0	15.3	14.8
V	7.50	7.4	4.51	4.2

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	369	362	394	348	342	329	363	348
MAX.	415	375	450	365	365	355	375	370
MIN.	335	330	360	335	320	315	350	330
R	80	45	90	30	45	40	25	40
S^2	874.7	475.0	437.1	67.8	204.5	224.2	82.5	232.1
S	29.6	21.8	20.9	8.2	14.3	15.0	9.1	15.2
V	8.02	6.01	5.31	2.37	4.17	4.55	2.50	4.38

TAB. 35: Temperatura de máxima contracción T₂ (Base como se analizó), Checua - Lengua-
zaque.

n	83
\bar{X}	414
MAX.	485
MIN.	370
R	115
S ²	747.28
S	27.34
V	.61
M 2	738.28
M 3	9823.83
M 4	1.36 x 10 ⁶
γ 1	0.49
γ 2	2.49

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	414	429	396	408
MAX.	475	485	465	430
MIN.	370	395	370	380
R	105	90	95	50
S ²	937.9	592.1	481.0	252.3
S	30.6	24.3	21.9	15.9
V	7.39	5.7	5.24	3.9

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
X	416	408	442	404	400	385	417	01
MAX.	475	420	485	420	465	410	430	420
MIN.	370	375	405	395	370	370	400	380
R	105	45	80	25	95	40	30	40
S ²	1097.8	475.0	387.1	48.9	519.8	260.0	182.5	211.9
S	33.1	21.8	19.7	7.0	22.8	16.1	13.5	14.6
V	7.96	5.35	4.46	1.73	5.71	4.19	3.24	3.63

TAB. 36: Temperatura de dilatación máxima T_3 (Base como se analizó), Checua - Lenguazaque.

n	82							
\bar{X}	469							
MAX	500							
MIN.	420							
R	80							
S^2	254.97							
S	15.97							
V	3.41							
M 2	251.86							
M 3	-2456.7							
M 4	2.3×10^5							
$\gamma 1$	-0.61							
$\gamma 2$	3.68							

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	17	30	23	12
\bar{X}	472	479	462	451
MAX.	490	500	485	470
MIN.	455	450	435	420
R	35	50	50	50
S^2	102.9	137.5	139.62	323.3
S	10.15	11.72	11.82	17.98
V	2.15	2.45	2.56	3.98

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	13	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	472	469	484	469	466	450	457	447
MAX.	490	470	500	485	485	465	470	465
MIN.	455	460	475	450	455	435	420	425
R	35	10	25	35	30	30	50	40
S^2	123.4	39.58	68.16	121.1	74.6	160.0	432.5	157.1
S	11.11	6.29	8.26	11.01	8.64	12.65	20.80	16.04
V	2.35	1.34	1.70	2.35	1.86	2.81	4.55	3.59

II y III), no se obtiene una variación estricta de éstas a través de los diferentes bloques (Tablas 34 a 36); mientras se encuentra que T_1 , T_2 y T_3 para los carbones del nivel TKg3, son menores que las correspondientes temperaturas de los carbones del nivel TKg2, lo cual obedece al mayor rango de estos últimos.

6.4.2.3. *Coefficiente G*.- Con el fin de cuantificar la capacidad aglomerante de los carbones estudiados, se calculó el coeficiente G, deducido por Simonis (GIBSON, 1971) a partir de las coordenadas de la curva dilatométrica en la zona plástica; él denomina este coeficiente como capacidad de coquización y puede usarse para predecir la resistencia del coque, ya que es aditivo. Pero los valores de G son realmente más representativos de la habilidad de las partículas para fundir y unirse unas a otras, por lo cual es preferible mirar G como una medida de la capacidad aglomerante más que de la coquizante.

El coeficiente G se calcula de la manera siguiente:

$$G = \frac{(T_1 + T_3)}{2} \cdot \frac{(c + d)}{c \cdot T_3 + d \cdot T_1}$$

Donde:

- T_1 : Temperatura de ablandamiento
- T_3 : Temperatura de resolidificación
- c : % Contracción
- d : % Dilatación

En la Tabla 37 se presentan los valores de G para todos los carbones de la zona estudiada, y la Figura 49 muestra la variación de este factor con el contenido de materias volátiles (b.s.l.cz). Como se deduce de esto, para la mayoría de muestras, G cae dentro del rango 0.95 - 1.15, lo cual los ubica como carbones de poder coquizable medio y fuertemente coquizables (GIBSON, 1971). Se observa también que no existen diferencias significativas en el coeficiente G, a través de los diferentes bloques.

Estudios experimentales muestran que $G = 0.95$ representa el límite más bajo de capacidad aglomerante para la producción de coque de resistencia aceptable; de los carbones analizados, G es inferior a 0.95 para las muestras 151356, 151395 y 151413 del manto La Cisquera; 151355, 151358 y 151362 posiblemente meteorizadas como se vio en la discusión precedente, 151430 con el mayor contenido de cenizas y 151386, todas ellas con dilatación negativa.

6.4.2.4. *Variación de la dilatación total con el contenido de volátiles*.- La Figura 50 muestra la variación de la dilatación total (contracción + dilatación), con el porcentaje de materias volátiles (B.C.S.A.); se observa un aumento de la dilatación a medida que crece el contenido de volátiles hasta aproximadamente 28%, y luego disminución de la dilatación total para volátiles mayores a este valor.

La mayoría de las muestras están por debajo del 28% de materias volátiles, y el ajuste por mínimos cuadrados de la porción A de la curva, dio un coeficiente de correlación relativamente alto ($r = 0.876$), lo cual indica una estrecha dependencia de estos dos parámetros; en la parte descendente (B en la Figura), si bien se detecta una tendencia de disminución de la dilatación con el aumento de volátiles, el coeficiente de correlación es de sólo 0.474.

Se encuentra acorde con lo citado en la literatura (LOWRY, 1963) que el hinchamiento medido en el dilatómetro es máximo para un contenido de volátiles de 25 a 30%, y corresponde a una dilatación total cercana a 280%.

Como se observa en la Figura 50, las muestras 151358, 151359, 151362, 151424 y 151425, presentan una marcada desviación del comportamiento general anotado. Si bien este hecho es explicable por el estado de alteración en las tres primeras, en las otras dos sería necesario conocer la composición maceral, puesto que por análisis químico no es posible determinar la causa de la relativamente baja dilatación. La meteorización de

TAB. 37: Factor G calculado del análisis dilatométrico para los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque.

Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Factor G	Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	Factor G
BLOQUE I NIVEL TKg2			BLOQUE II NIVEL TKg3		
151354	1	1.04	151363	10	1.14
151355	2	0.30	151377	24	1.13
151356	3	0.59	151390	37	1.11
151413	60	0.85	151391	38	1.14
151414	61	1.01	151393	40	1.11
151415	62	1.04	151403	50	1.11
151416	63	1.04			
151417	64	1.08	BLOQUE III NIVEL TKg2		
151418	65	1.11			
151419	66	1.09	151362	9	0.91
151420	67	1.03	151366	13	1.12
151421	68	1.03	151423	70	1.10
151422	69	1.04	151424	71	1.04
151426	73	1.03	151425	72	1.05
151427	74	1.00			
151428	75	1.03	BLOQUE III NIVEL TKg3		
151429	76	1.06			
151430	77	0.20	151357	4	1.08
151431	78	1.10	151358	5	0.87
151432	79	1.11	151359	6	1.00
			151360	7	1.15
BLOQUE I NIVEL TKg3			151361	8	1.09
151367	14	1.08	151364	11	1.09
151368	15	1.11	151365	12	1.12
151369	16	1.14			
151370	17	1.12	BLOQUE V NIVEL TKg2		
141371	18	1.15	151394	41	1.13
151372	19	1.18	151395	42	0.49
151381	28	1.11	151396	43	1.08
151382	29	1.15	151397	44	1.02
151383	30	1.15	151398	45	1.06
151384	31	1.04	151399	46	1.10
			151400	47	1.09
BLOQUE II NIVEL TKg 2			151401	48	1.15
151373	20	1.12	151402	49	1.02
151374	21	1.11	151408	55	1.11
151375	22	1.13	151433	80	
151376	23	1.15	151434	81	1.05
151378	25	1.14	151435	82	1.03
151379	26	1.13	151436	83	1.02
151380	27	1.12			
151385	32	0.97	BLOQUE V NIVEL TKg3		
151386	33	0.20			
151387	34	1.04	151409	56	1.13
151388	35	1.04	151410	57	1.10
151389	36	1.05	151411	58	1.06
151392	39	1.16	151412	59	1.10
151404	51	1.12			
151405	52	1.16			
151406	53	1.14			
151407	54	1.15			

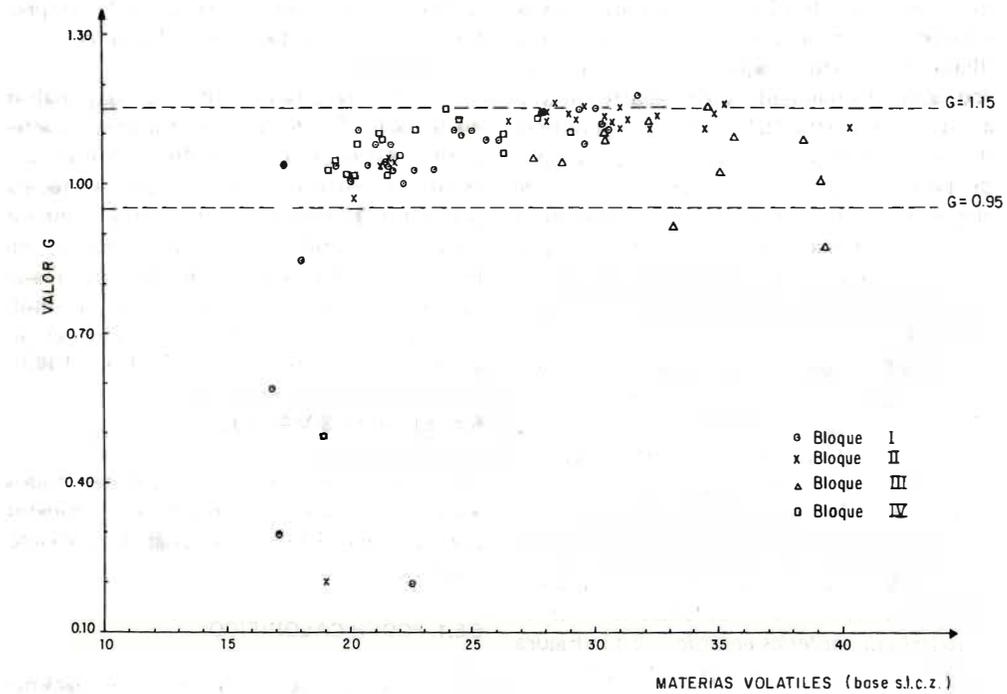


FIG. 49: Relación entre valor G y materias volátiles en las muestras de la Zona Checua-Lenguazaque.

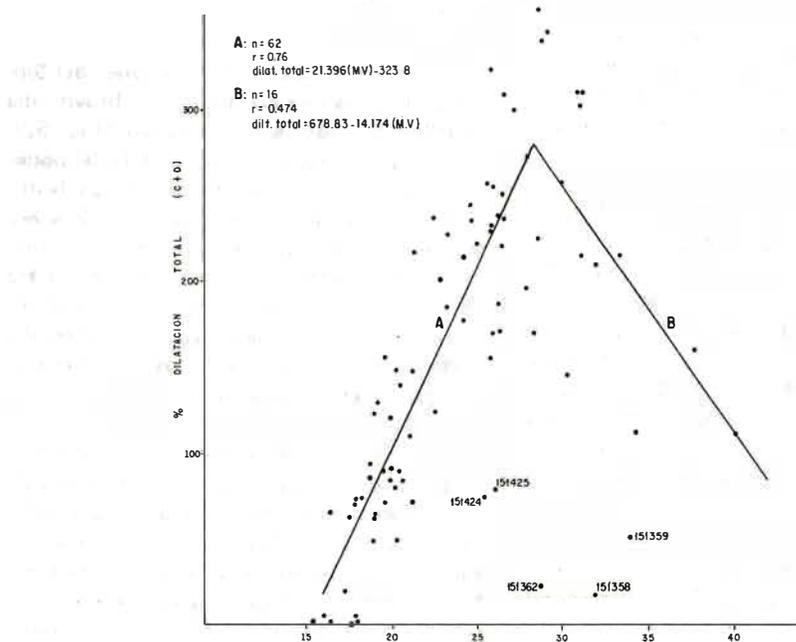


FIG. 50: Relación entre contenido de materias volátiles (b.c.s.a.) y porcentaje de dilatación total (contracción + dilatación) en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

los carbones 151358 y 151362 puede establecerse del alto contenido de oxígeno, dilatación negativa, bajo rango plástico, bajo índice de hinchamiento y alto azufre sulfato; aunque la muestra 151359 tiene un contenido de oxígeno acorde con su rango, y poca dilatación positiva, sí presenta signos de alteración, por su bajo rango plástico, bajo índice de hinchamiento y también alto contenido de sulfato.

Cuando el contenido de materias volátiles excede de 32%, caso de la muestra 151393, y la mayoría de los carbones del nivel TKg3, Bloque III, es factible esperar la producción de coques altamente fisurados debido a los fenómenos de contracción (GIBSON, 1971).

6.4.2.5. Variación de las temperaturas características de dilatometría con el contenido de materias volátiles.- En la Figura 51 se observa la relación de las temperaturas de ablandamiento, máxima contracción y máxima dilatación con el contenido de materias volátiles, para las muestras de la zona Checua-Lenguazaque.

La temperatura de ablandamiento (T_1) disminuye de 405 a 315°C con una variación de las materias volátiles de 16 a 37%. El coeficiente de correlación logarítmica encontrado para estos parámetros es de 0.715.

Como se indica en la misma figura, la correlación es más alta, $r = 0.728$, con la temperatura de máxima contracción (T_2), y existe aún mucho mayor relación entre el punto de máxima dilatación (T_3) y el contenido de materias volátiles, como se deduce de la correlación obtenida $r = 0.743$. Así para el aumento de volátiles en el rango indicado, se encuentra una disminución de la temperatura de máxima dilatación de 495 a 440°C, como lo indica la curva T_3 .

Aunque con las temperaturas T_1 y T_2 , la variación con los volátiles corresponde mejor a una relación logarítmica que a una lineal, con la temperatura T_3 se obtiene mayor correlación ($r = 0.751$) mediante la re-

gresión lineal, como se deduce de los respectivos coeficientes dados en la Tabla 44.

Los resultados obtenidos del análisis de la variación de las temperaturas características del ensayo dilatométrico con el contenido de volátiles, muestra que a medida que estos aumentan, es decir que a menor rango del carbón, las temperaturas disminuyen y la temperatura de máxima dilatación lo hace de una forma casi lineal, resultado que era de esperarse con base en lo citado en la literatura (LOWRY, 1963).

6.5. ENSAYOS VARIOS

En este numeral se agrupan todos aquellos ensayos que no están cobijados por las definiciones de análisis próximo y último.

6.5.1. PODER CALORIFICO

Resulta obvio que este es el parámetro más importante en el análisis de un carbón que va a ser utilizado con fines térmicos; esto hace que sea una determinación exigida en los contratos de comercialización del carbón.

Para el caso de los carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque se obtuvo una distribución con sesgo negativo (Fig. 52). Puesto que existe una dependencia del poder calorífico con el contenido de cenizas, la discusión efectuada en el parágrafo 6.2.2. sobre las cenizas las podemos aplicar en sentido opuesto al poder calorífico; es decir que era de esperarse sesgo contrario y que la distribución estuviera cargada hacia los valores del poder calorífico propio de los carbones con menos contenido de cenizas.

La distribución del poder calorífico está a la vez marcada por la dependencia de contenido de cenizas, el rango y la composición del carbón. La Figura 53 muestra la variación del poder calorífico en los diferentes bloques dejando ver ligeros cambios con tendencia a registrar valores más altos a medida que se avanza de sur a norte en el sinclinal.

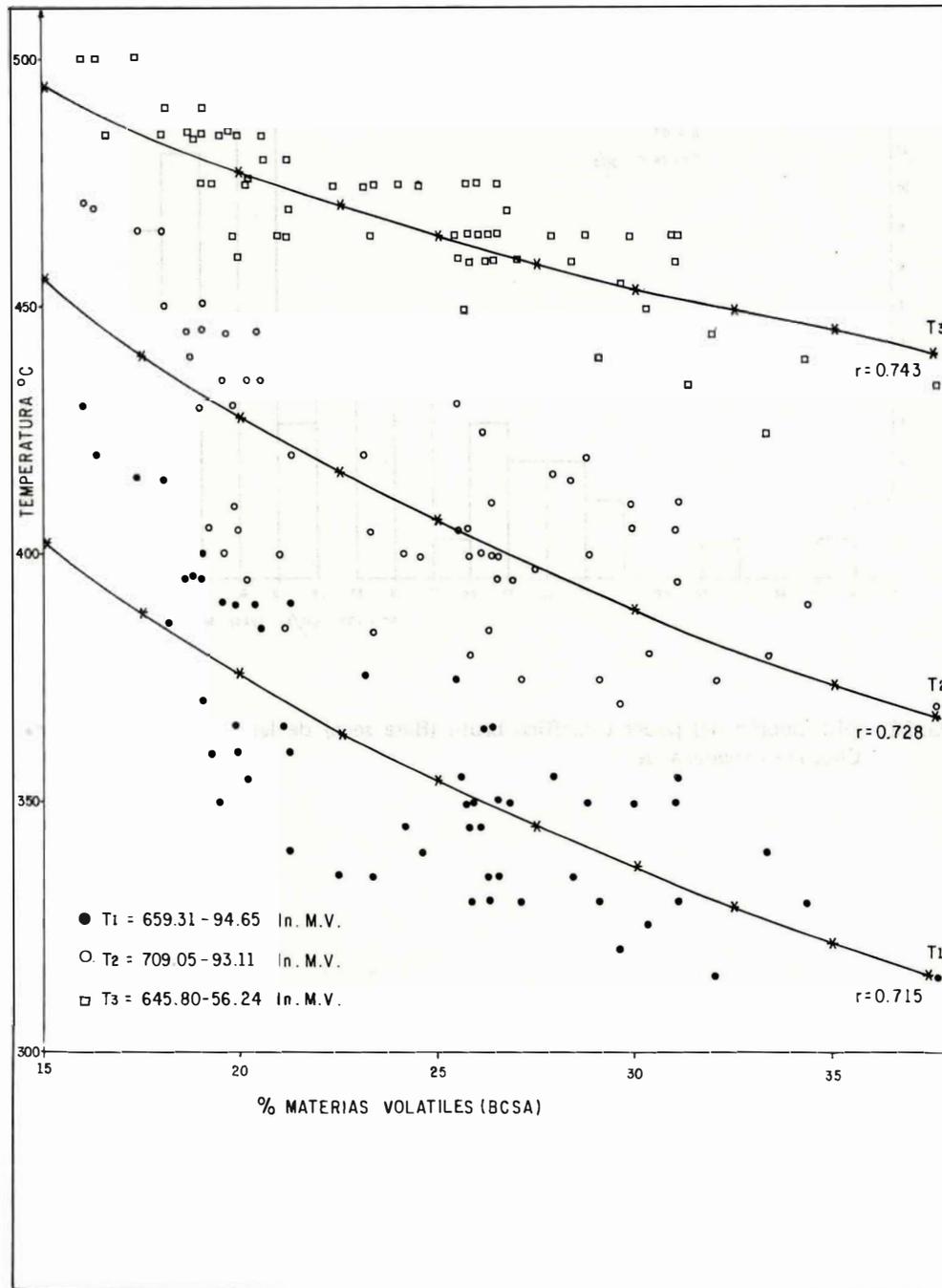


FIG. 51: Relación entre materias volátiles y las temperaturas de ablandamiento (T₁), de máxima contracción (T₂) y de máxima dilatación (T₃).

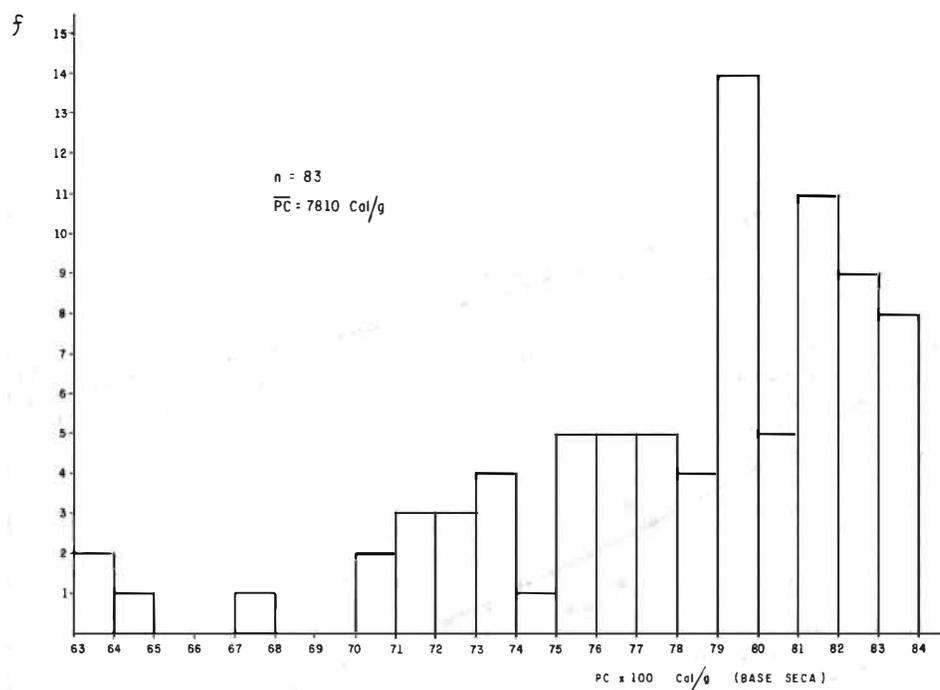


FIG. 52: Distribución del poder calorífico bruto (Base seca) de las muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

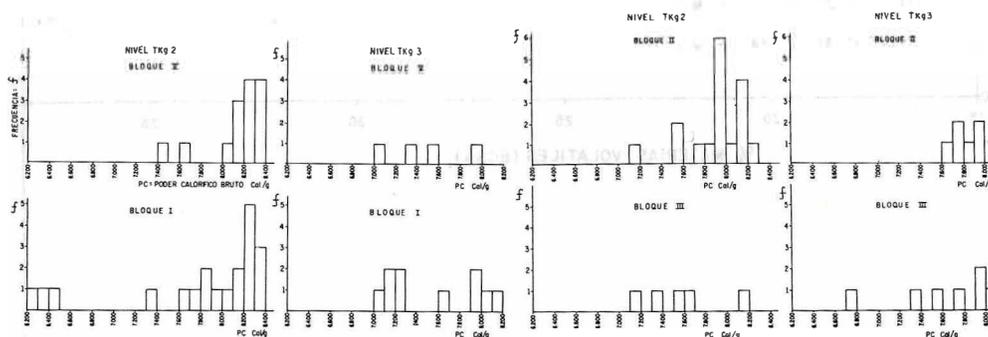


FIG. 53: Distribución del poder calorífico bruto (Base seca) en los diferentes bloques y niveles de las muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

Tratando de minimizar el efecto de las cenizas también se efectuó el análisis de este parámetro en base seca libre de cenizas observándose dos hechos: primero, que son casi imperceptibles las variaciones entre los distintos bloques y niveles (Fig. 54) y segundo, que hay una gran centralización en las distribuciones y los máximos rangos estadísticos (R) no superan las 450 calorías/gr (contra más de 2.000 calorías gr en base seca).

Este punto lo podemos apreciar claramente comparando los rangos estadísticos, coeficientes de variación o desviación estándar de las Tablas 38 y 39.

La Figura 55 muestra la distribución general en la zona estudiada, de los valores de poder calorífico en base seca libre de cenizas.

Estos hechos están de acuerdo con lo encontrado por varios autores en el sentido que el poder calorífico se incrementa rápidamente con el rango, pero tiende a estabilizarse en un valor a partir de los carbones medios en volátiles (1.1% de reflectancia máxima). (BENEDICT, WILLIAM, BERRY, 1966; STACH, et al., 1982). La mayoría de los carbones de la zona son de rango mayor (31% MV).

Para carbones de un grado de carbonificación dado, el poder calorífico libre de cenizas tiende a ser una constante.

6.5.2. HUMEDAD DE EQUILIBRIO

Teóricamente esta humedad es la que un carbón puede retener cuando está en equilibrio con una atmósfera del 100% de humedad relativa; pero dadas las dificultades físicas este ensayo se efectúa a un 96-97%.

La utilidad de este parámetro radica en que permite expresar los resultados, concretamente el poder calorífico en base húmeda y poder clasificar los carbones altos en volátiles hasta lignitos.

Igualmente es útil para estimar la

humedad superficial cuando se conoce el contenido de humedad total (REES, 1966).

Para el área de Checua-Lenguazaque los valores de humedad de equilibrio encontrados son relativamente bajos, especialmente para los bloques V y I los cuales no muestran prácticamente diferencias entre sí. (Distribuciones similares e iguales promedios). La disminución de rango en los bloques II y III, hace detectar el consecuente aumento en el porcentaje de humedad de equilibrio, que para el Bloque II muestra niveles relativamente más elevados (Fig. 56 y Tab. 40).

La Figura 57, que muestra la distribución general de la humedad de equilibrio, refleja la superposición de poblaciones diferentes, pues presenta una notoria disminución hacia el centro del histograma.

Al comparar el contenido de humedad de equilibrio en los dos niveles, TKg2 y TKg3, no se hace evidente ninguna variación significativa (Figs. 29 y 30).

6.5.3 INDICE DE MOLIENDA - HARDGROVE

El índice Hardgrove da una medida del grado de facilidad de molienda del carbón e indica la capacidad de procesamiento de los molinos; es por tanto un parámetro exigido en preparación, combustión, coqueización, etc.

Para carbones térmicos es necesario este parámetro en el diseño del equipo de centrales de generación eléctrica. Si un carbón tiene un índice inferior al nivel de diseño, debe realizarse un mayor trabajo en la trituración del carbón para lograr una distribución uniforme del tamaño de las partículas y éstas a su vez estarán fijadas por la reactividad del carbón de la cual dependen la estabilidad en la ignición y el quemado (McBRIDE, 1981).

Como ejemplo de la utilización de este parámetro veámos su influencia en el diseño del molino para alimentar una caldera típica de combustible pulverizado y utiliza-

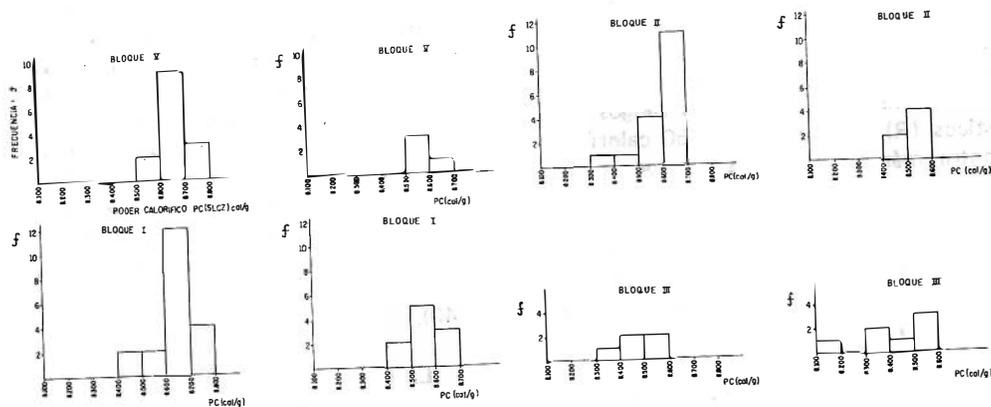


FIG. 54: Distribución del poder calorífico bruto (s.l.cz.) en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguazaque.

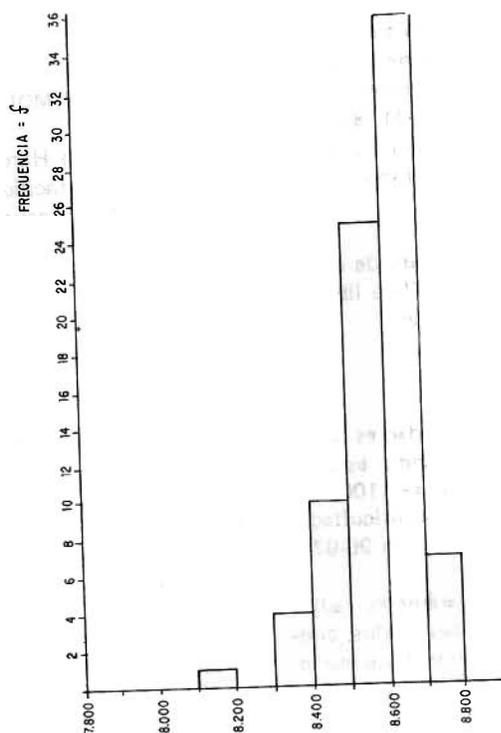


FIG. 55: Distribución general del poder calorífico (s.l.cz.) en las muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

TAB.38: Poder calorífico Cal/gr (Base Seca), Zona Checua - Lenguaque.

n	83
\bar{X}	7810
MAX.	8396
MIN.	6293
R	2103
S ²	2.25 x 10 ⁵
S	474.07
V	6.07
M 2	2.22 x 10 ⁵
M 3	-1.37 x 10 ⁸
M 4	2.44 x 10 ¹¹
γ 1	-1.31
γ 2	4.97

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
X	8007	7721	7885	7594
MAX.	8396	8332	8266	8105
MIN.	7061	6293	7136	6721
R	1335	2039	1130	1384
S ²	1.64 x 10 ⁵	3.74 x 10 ⁵	6.28 x 10 ⁴	1.60 x 10 ⁵
V	5.05	7.93	3.18	5.27

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
X	8158	7475	7801	7561	7907	7823	7573	7609
MAX.	8396	7949	8332	8136	8266	7996	8105	8023
MIN.	7453	7061	6293	7086	7136	7666	7200	6721
R	943	888	2039	1050	1130	330	905	1302
S ²	7.01x10 ⁴	1.38x10 ⁵	4.66x10 ⁵	1.79x10 ⁵	8.0x10 ⁴	1.45x10 ⁴	1.16x10 ⁵	2.16x10 ⁵
S	264.8	371.5	683.2	422.8	282.7	120.3	341.3	464.6
V	3.25	4.97	8.76	5.59	3.57	1.94	4.50	6.11

TAB. 39: Poder calorífico bruto (Base Seca Libre de Cenizas), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	8584
MAX.	8743
MIN.	8112
R	631
S ²	12085,56
S	109.93
V	1.28
M 2	11712.06
M 3	- 1.87 x 10 ⁶
M 4	8.90 x 10 ⁸
γ 1	-1.48
γ 2	6.49

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	8648	8621	8567	8434
MAX.	8727	8743	8675	8564
MIN.	8543	8429	8358	8112
R	184	314	317	452
S ²	3864.0	6690.5	6202.4	18224.0
S	60.70	81.80	78.76	135.00
V	0.70	0.95	0.92	1.60

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	8668	8578	8644	8572	8587	8510	8469	8412
MAX.	8727	8636	8743	8640	8675	8584	8564	8545
MIN.	8543	8547	8429	8446	8358	8422	8303	8112
R	184	89	314	194	317	162	261	433
S ²	2564.3	1549.7	6586.8	3796.7	6011.2	2818.6	9587.3	26190.8
S	50.64	39.37	81.16	61.62	77.53	53.09	97.91	161.50
V	0.58	0.46	0.94	0.72	0.90	0.62	1.16	1.92

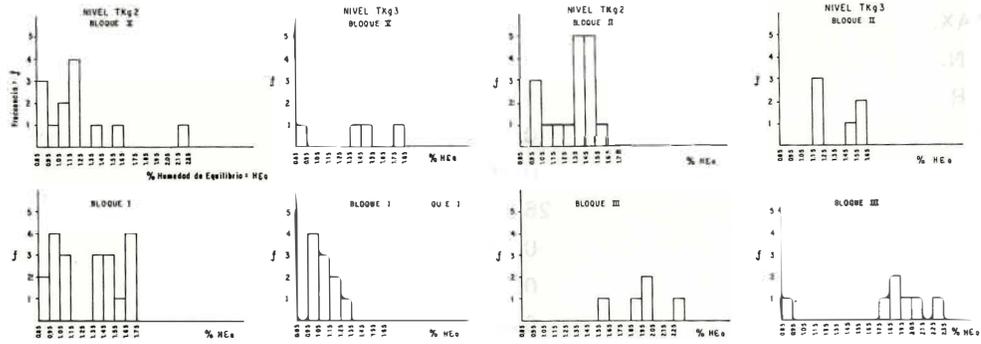


FIG. 56: Distribución de la humedad de equilibrio en los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua - Lenguaque.

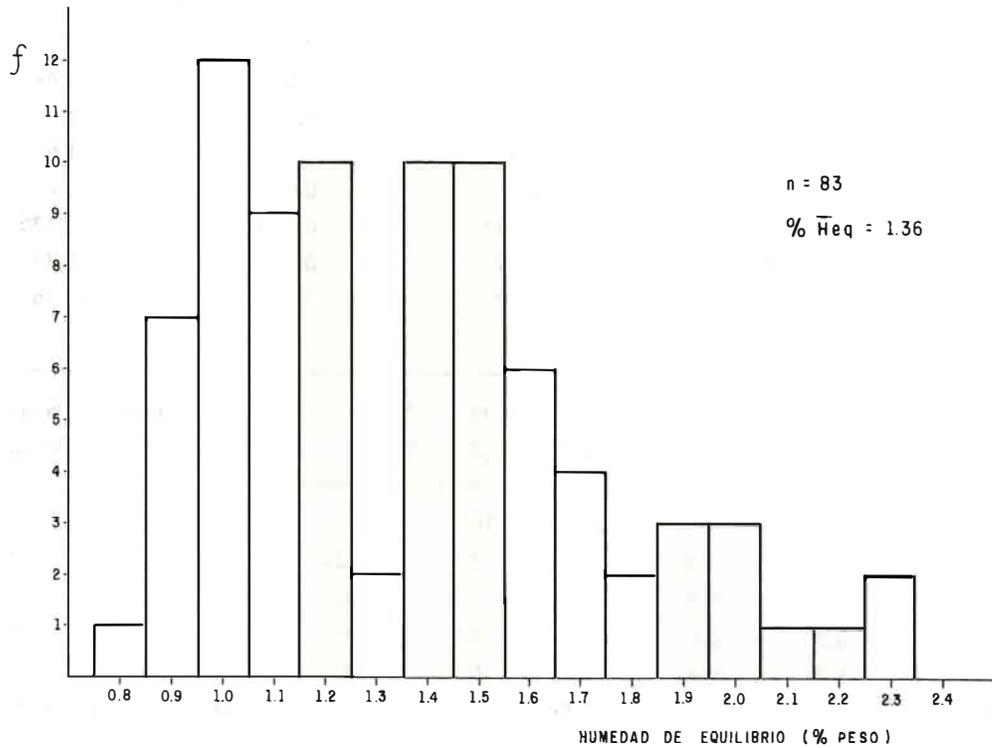


FIG. 57: Distribución de la humedad de equilibrio de muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

TAB. 40: Humedad de equilibrio (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83							
\bar{X}	1.36							
MAX.	2.3							
MIN.	0.8							
R	1.5							
S ²	0.13							
S	0.36							
V	26.55							
M 2	0.13							
M 3	0.032							
M 4	0.047							
γ 1	0.68							
γ 2	2.79							

	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
n	18		30		23		12	
\bar{X}	1.24		1.24		1.35		1.89	
MAX.	2.2		1.7		1.6		2.3	
MIN.	0.9		0.9		1.0		1.6	
R	1.3		0.8		0.6		0.7	
S ²	0.132		0.071		0.039		0.135	
S	0.36		0.27		0.20		0.37	
V	29.32		21.56		14.65		19.45	

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	1.19	1.40	1.31	1.10	1.34	1.38	1.96	1.84
MAX.	2.2	1.8	1.7	1.3	1.6	1.6	2.3	2.3
MIN.	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.2	1.6	0.9
R.	1.3	0.9	0.8	0.3	0.6	0.4	0.7	1.4
S ²	0.130	0.140	0.084	0.011	0.040	0.042	0.063	0.200
S	0.36	0.37	0.30	0.11	0.20	0.20	0.25	0.45
V	30.22	26.73	22.69	9.58	14.96	14.76	12.81	24.24

TAB. 41: Indice de molienda Hardgrove (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83
\bar{X}	89
MAX.	157
MIN.	47
R	110
S^2	357.82
S	18.92
V	21.21
M 2	353.51
M 3	1451.77
M 4	513476.80
$\gamma 1$	0.22
$\gamma 2$	4.11

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
X	101	98	82	64
MAX.	116	157	129	75
MIN.	84	73	50	47
R	32	84	89	28
S^2	83.36	249.96	250.27	108
S	9.13	15.81	15.82	10.41
V	9.07	16.09	19.37	16.36

	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3	Nivel TKg2	Nivel TKg3
n	14	4	20	10	17	6	5	7
X	104	90	104	87	87	65	68	61
MAX.	116	96	157	101	129	77	75	75
MIN.	86	84	87	73	70	50	55	47
R.	30	12	70	28	59	27	20	28
S^2	55.50	25.60	247.75	63.04	176.89	100.60	73.62	125.22
S	7.45	5.06	15.74	7.94	13.30	10.03	8.58	11.19
V	7.17	5.64	15.14	9.15	15.21	15.36	12.66	18.43

TAB. 42: Gravedad específica aparente (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque.

n	83							
\bar{X}	1.31							
MAX.	1.50							
MIN.	1.22							
R	0.28							
S^2	2.68×10^{-3}							
S	0.05							
V	3.93							
M 2	2.64×10^{-3}							
M 3	1.10×10^{-4}							
M 4	3.00×10^{-5}							
$\gamma 1$	0.81							
$\gamma 2$	4.29							

	Bloque V		Bloque I		Bloque II		Bloque III	
n	18		30		23		12	
\bar{X}	1.31		1.33		1.31		1.31	
MAX.	1.44		1.50		1.43		1.41	
MIN.	1.23		1.23		1.22		1.23	
R	0.21		0.27		0.21		0.18	
S^2	2.0×10^{-3}		3.2×10^{-3}		2.6×10^{-3}		2.2×10^{-3}	
S	0.04		0.06		0.05		0.05	
V	3.39		4.24		3.95		3.60	

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel TKg2		Nivel TKg3	
n	14		4		20		10		17		6	
\bar{X}	1.30		1.32		1.32		1.36		1.31		1.30	
MAX.	1.44		1.33		1.40		1.50		1.43		1.35	
MIN.	1.23		1.30		1.23		1.28		1.22		1.23	
R.	0.21		0.03		0.17		0.22		0.21		0.12	
S^2	2.5×10^{-3}		1.7×10^{-4}		2.1×10^{-3}		4.4×10^{-3}		3.0×10^{-3}		1.9×10^{-3}	
S	0.05		0.01		0.04		0.07		0.06		0.04	
V	3.82		0.98		3.49		4.89		4.21		3.34	

ción de amplia gama de calidades de carbón. Los límites aceptables son: mínimo 43 a 48 dependiendo del poder calorífico y máximo 70.

El efecto del índice de Hardgrove sobre la capacidad del molino comienza a ser significativo cuando este es inferior a 45 pudiendo ocasionar una reducción en la carga de la caldera.

El máximo índice aceptado no es un límite absoluto sino que sirve de aviso sobre posibles dificultades en el manejo de dicho carbón (McBRIDE, 1981). Con este punto de vista, el 80% de los carbones de Checua-Lenguazaque estudiados, que poseen un índice Hardgrove alto, podrían eventualmente presentar problemas, pues esto implica que son muy pulverizables y se disintegran en su manejo, carga, transbordo, descarga, apilamiento y almacenamiento. Si el grado de desintegración es suficiente para producir grandes cantidades de finos, existe el peligro de que el carbón se bloquee en los silos y restrinja su paso a los molinos.

Para los carbones del Bloque I y V, esto se haría más marcado pues son estos bloques los que registran los mayores índices de molienda, casi todos del orden de 100.

La variación de los índices de molienda Hardgrove en los diferentes bloques y niveles es clara cuando observamos las Figuras 29 y 58. Estas muestran cómo a medida que se avanza hacia el norte en el sinclinal, el índice aumenta, o sea, a medida que el rango crece (del bloque III hacia el V) se registran mayores índices de molienda Hardgrove.

La comparación entre los dos niveles estratigráficos también muestra índices menores para el nivel TKg3 que para el TKg2 (Figura 30). La distribución general para la zona muestra valores altos y muy poco sesgo (Figura 59)

La Tabla 41 muestra los resultados del tratamiento estadístico de los datos obtenidos para esta variable.

Es usual efectuar el análisis del contenido de humedad a la cual se realiza el ensayo de índice de molienda; sin embargo algunas determinaciones mostraron valores prácticamente iguales a los determinados en el ensayo de humedad residual, por lo cual se juzgó innecesario reportar estos valores.

6.5.4. GRAVEDAD ESPECIFICA

La gravedad específica del carbón es su densidad en relación a la densidad del agua a una temperatura dada, usualmente 4°C. No tiene dimensiones.

En razón a la naturaleza porosa del carbón, es necesario distinguir entre gravedad específica verdadera y gravedad específica aparente. Esta última es la gravedad específica del carbón en trozos, con humedad inherente, materia mineral y aire incluido en los poros. La gravedad específica verdadera es la del carbón seco y libre de aire, pero que contiene materia mineral (LOWRY, 1963).

Los carbones de mayor rango tienden a dar gravedad específica más alta. Este aumento en la gravedad específica puede deberse al rompimiento progresivo de los hidrocarburos, pérdida de los grupos atómicos más livianos y reorganización en grupos más pesados durante la carbonificación.

Las diferencias en gravedad específica debidas al rango, pueden ocultar la correlación del porcentaje de cenizas con la gravedad específica aparente. El diferente contenido de humedad contribuye probablemente a la dispersión de los datos.

Varios autores han encontrado un aumento aproximado de 0.01 en la gravedad específica aparente por cada 1% de aumento en cenizas. Sin embargo, esta relación no es estricta y debe modificarse para carbones que contienen cantidades considerables de compuestos de hierro (LOWRY, 1963).

6.5.4.1. *Gravedad específica aparente.*- Los resultados encontrados para esta va-

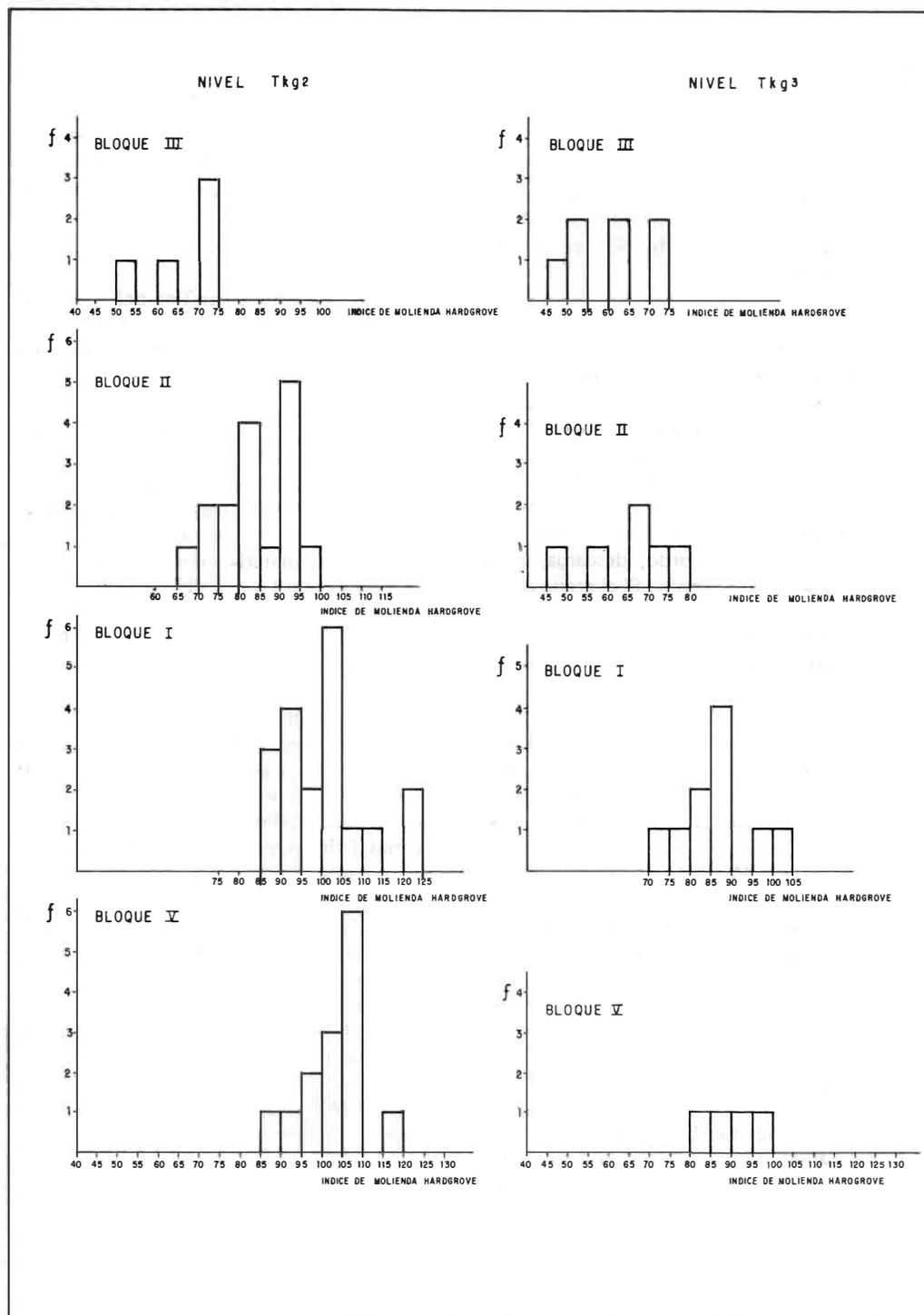


FIG. 58: Distribución del índice de molienda Hardgrove en los diferentes bloques y niveles

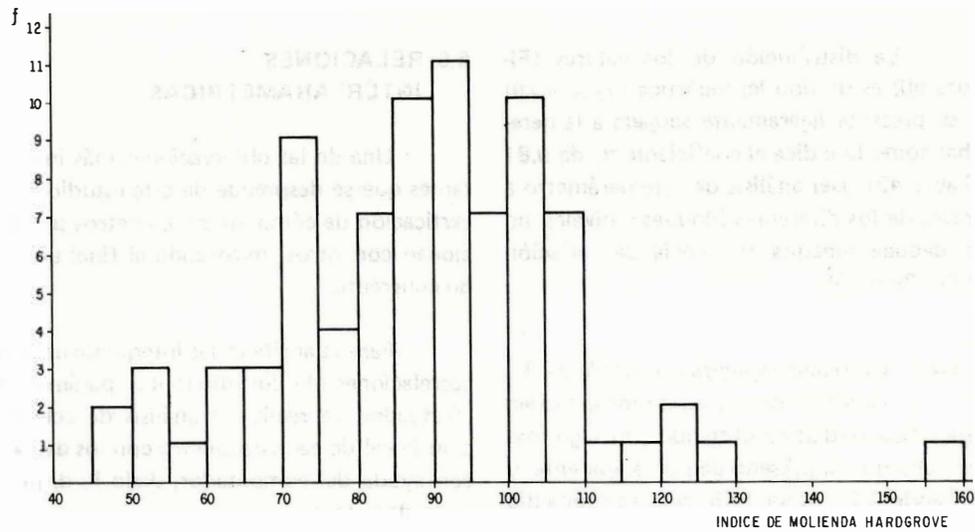


FIG. 59: Distribución del índice de molienda Hardgrove en las muestras de la Zona Checua-Lenguazaque.

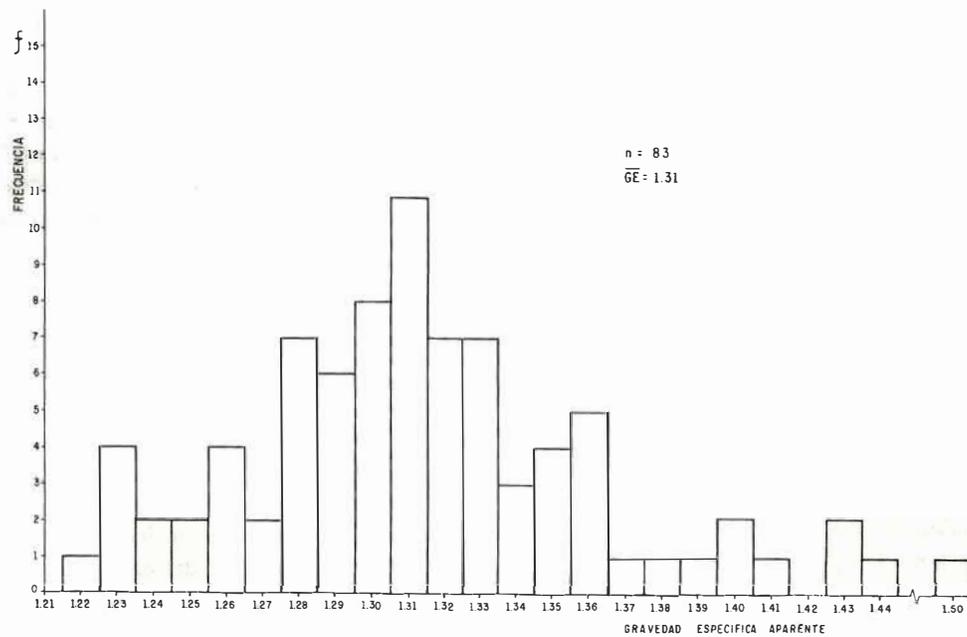


FIG. 60: Distribución de la gravedad específica aparente en las muestras de la Zona Checua-Lenguazaque.

riable en la zona estudiada oscilan entre 1.22 y 1.50, con un promedio de 1.31.

La distribución de los valores (Figura 60) es de tipo leptocúrtica ($\gamma_2 = 4.29$) y se presenta ligeramente sesgada a la derecha; como lo indica el coeficiente γ_1 de 0.81 (Tabla 42). Del análisis de este parámetro a través de los diferentes bloques y niveles, no se deduce ninguna tendencia de variación (Figs. 29 y 30).

6.5.4.2. *Gravedad específica verdadera.*- La variación de los valores de gravedad específica verdadera obtenidos, es algo más estrecha que la presentada por la aparente, y va desde 1.25 hasta 1.45, con un promedio de 1.32 (Fig. 61). Su distribución es del mismo tipo de la anterior, o sea, sesgo positivo y apuntamiento relativo alto, características dadas por los coeficientes respectivos de la Tabla 43.

Se deduce de los valores promedio obtenidos para cada uno de los bloques y niveles, que no existe una variación regular de este parámetro en la zona estudiada (Fig. 62).

Se encuentra una mayor relación entre el contenido de cenizas y la gravedad específica verdadera, que con la gravedad específica aparente. Resulta evidente este hecho al comparar los coeficientes de correlación de cada una de las gravedades contra el porcentaje de cenizas (b.c.s.a.): 0.5428 para la aparente y 0.9010 para la verdadera. Esta correlación relativamente alta, obedece seguramente, por una parte al hecho de que no existen grandes diferencias en rango en los carbones estudiados, y por otra parte a que la gravedad específica verdadera se determina sobre la muestra seca y libre de aire, lo cual elimina las posibles diferencias debidas a estos factores. La variación de la gravedad específica verdadera (G.E.V) con el contenido de cenizas, se muestra en la Figura 63 y

corresponde a la siguiente ecuación G.E.V. = $0.0077 \times Cz + 1.2536$ (valores en b.c.s.a.).

6.6. RELACIONES INTERPARAMETRICAS

Una de las observaciones más importantes que se desprende de este estudio es la verificación de cómo unos parámetros se relacionan con otros, mostrando al final un todo coherente.

Para cuantificar las interdependencias o correlaciones de los diferentes parámetros efectuados, se realiza el análisis de correlación lineal de cada parámetro con los demás, con ayuda del computador, dado lo dispendioso de la tarea.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 44 donde se registra el coeficiente de correlación, r , para cada pareja de parámetros. Para 83 muestras (82 grados de libertad), un coeficiente de correlación de 0.342 ya tiene un nivel de significancia de 0.001.

En este capítulo se discuten las relaciones más notables, cuyo resumen se muestra en la Tabla 45 donde se dan los parámetros analizados, la base de cálculo escogida para el análisis, el coeficiente de correlación y la ecuación obtenida.

6.6.1. CORRELACION DEL CONTENIDO DE MATERIAS VOLATILES CON ALGUNOS PARAMETROS

6.6.1.1. *Materia volátil y carbono.*- Como es bien conocido, estas dos variables han sido ampliamente usadas en varios sistemas de clasificación como indicadores del grado de metamorfismo del carbón; el contenido de materias volátiles disminuye a medida que aumenta el rango, mientras que el carbono aumenta progresivamente y uniformemente. Para eliminar la influencia de la materia mineral y de la humedad, se determi-

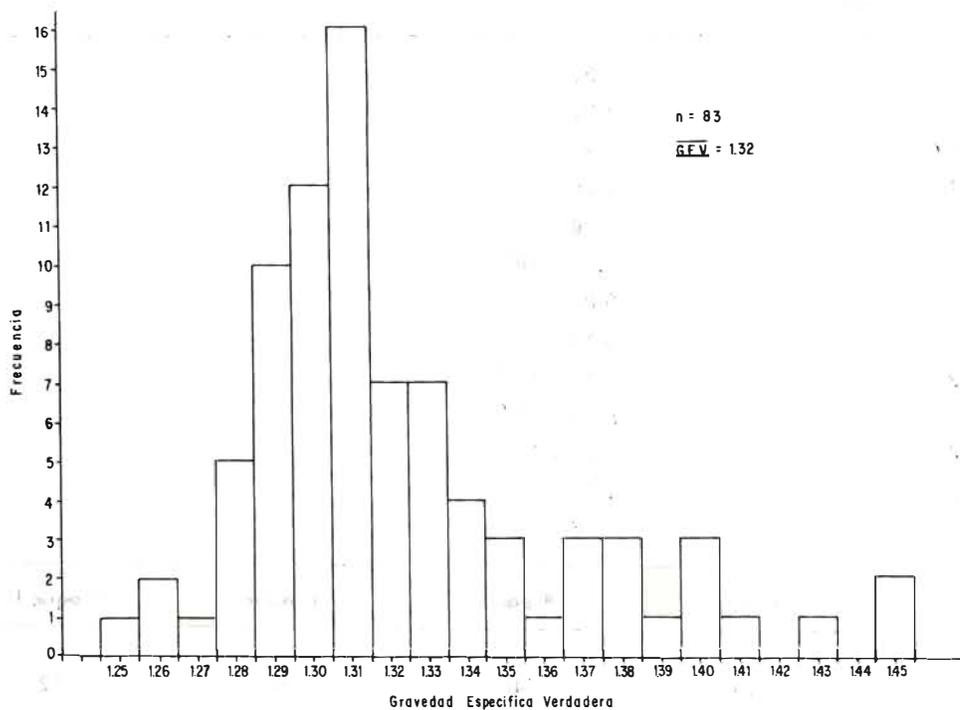


FIG. 61: Distribución de los valores de gravedad específica verdadera en los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque.

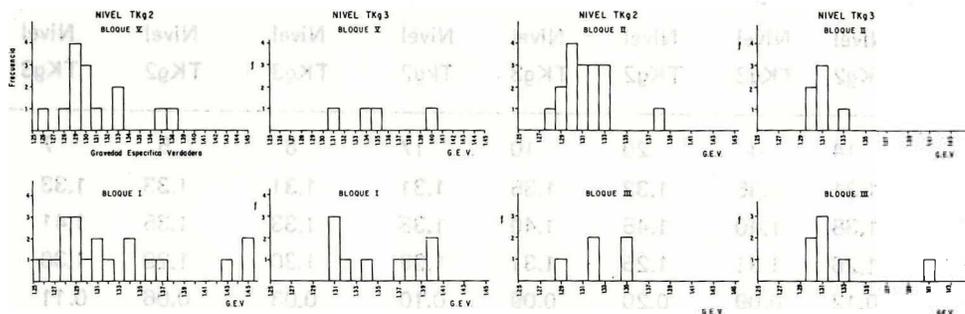


FIG. 62: Distribución de la gravedad específica verdadera en los diferentes bloques y niveles

TAB. 43: Gravedad Específica verdadera (Base como se analizó), Zona Checua - Lenguazaque .

n	83			
\bar{X}	1.32			
MAX.	1.45			
MIN.	1.25			
R	0.20			
S ²	1.71 x 10 ⁻³			
S	0.04			
V	3.13			
M 2	1.69 x 10 ⁻³			
M 3	8.10 x 10 ⁻⁵			
M 4	1.19 x 10 ⁻⁵			
γ 1	1.16			
γ 2	4.16			

	Bloque V	Bloque I	Bloque II	Bloque III
n	18	30	23	12
\bar{X}	1.32	1.33	1.31	1.33
MAX.	1.40	1.45	1.38	1.41
MIN.	1.26	1.25	1.28	1.29
R	0.14	0.20	0.10	0.12
S ²	1.42x10 ⁻³	3.17x10 ⁻³	4.09x10 ⁻⁴	1.06x10 ⁻³
S	0.04	0.06	0.02	0.03
V	2.86	4.16	1.54	2.46

	Nivel TKg2		Nivel TKg3		Nivel Tkg2		Nivel TKg3	
n	14	4	20	10	17	6	5	7
\bar{X}	1.31	1.35	1.32	1.35	1.31	1.31	1.33	1.33
MAX.	1.38	1.40	1.45	1.40	1.38	1.33	1.35	1.41
MIN.	1.26	1.31	1.25	1.31	1.28	1.30	1.29	1.30
R	0.12	0.09	0.20	0.09	0.10	0.03	0.06	0.11
S ²	0.0011	0.0014	0.0037	0.0015	5.2x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻⁴	6.3x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻³
S	0.03	0.04	0.06	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04
V	2.56	2.77	4.57	2.87	1.74	0.84	1.89	2.95

TAB. 44: Coeficientes de correlación entre los diferentes parámetros de los carbones de la Zona Checua - Lenguazaque en base como se analizó.

	GEA	HE	HR	CZ	MV	PC	S	C	H	N	IMH	%D	IH	T ₁	T ₂	T ₃
GEV	0.546															
HE	0.050 ⁺															
HR	-0.085 ⁺	0.6944*														
CZ	0.4022	0.1735	0.1290													
MV	0.0266 ⁺	0.2486	0.4859	0.01255												
PC	-0.393 ⁺	-0.3100	-0.3077	-0.9745*	-0.1697											
S	0.067	0.0508	0.2621	0.3600	0.4308	-0.4173										
C	-0.3492	-0.3178	-0.3470	-0.9429*	-0.3015	0.9815*	-0.4891									
H	-0.360 ⁺	0.2756	0.3591	-0.2737	0.6918*	0.1481	0.2494	0.0207								
N	-0.359 ⁺	-0.1507	-0.2550	-0.5798	0.1146	0.5911	-0.0457	0.5226	0.3554							
IMH	-0.076 ⁺	0.0292	-0.095 ⁺	-0.497 ⁺	0.8349*	0.4191	-0.562 ⁺	0.562 ⁺	0.005 ⁺	0.374 ⁺						
%D	-	-0.2246	-0.0661	0.0252	0.5810	0.0306	-0.2844	-0.1340	0.3795	0.2565	-					
IH	-	0.5917	-0.6533*	-0.4212	-0.3321	0.5528	-0.4108	0.5665	-0.1431	0.4701	-	0.2396				
T ₁	-	0.1398	-0.0690	0.0115	-0.6852*	0.0567	-0.2824	0.1329	-0.3365	-0.0728	-	-0.6154*	-0.0280			
T ₂	-	-	-	-	-0.6969*	-	-	0.1112	-	-	-	-0.6904*	-0.0845	0.8998*		
T ₃	-	-	-	-0.0600	-0.7506*	0.2104	-	0.2715	-0.4550	-	-	-0.2746	0.4039	0.6603*	0.6977*	

⁺ = Solo para el Bloque I

* = Para 82 grados de libertad r es significativo al 99.9% Para los valores superiores a 0.342 se indican los parámetros con correlación más estrecha.

TAB. 45: Relaciones Interparamétricas con alta correlación en la Zona Checua - Lenguazaque.

VARIABLE INDEPENDIENTE Y	VARIABLE DEPENDIENTE X	BASE DE CALCULO	COEFICIENTE DE CORRELACION	ECUACION
Humedad de equilibrio %	Humedad Residual %	CSA	0.6945	HE = 0.6974 (HR) + 0.8211
Gravedad Esp. Verdadera	% Cenizas	CSA	0.9010	GEV = 0.0077 (CZ) + 1.2536
Indice de Hinchamiento	Humedad Residual %	CSA	-0.6533	IH = 8.96 - 2.23 (HR)
% Carbono	Poder Calorífico Cal/gr.	CSA	0.9813	% C = 0.01074 (PC) - 3.8776
% Carbono	% Cenizas	CSA	-0.9429	% C = 88.5412 - 1.0213 (CZ)
Temp. de Ablandamiento T ₁	% Materia Volátil	CSA	0.715	T ₁ = 65E.31 - 94.65 ln (MV)
Temp. de Máx. contracción T ₂	% Materia Volátil	CSA	0.728	T ₂ = 709.05 - 93.11 ln (MV)
Temp. de Máx. Dilatación T ₃	% Materia Volátil	CSA	0.743	T ₃ = 645.80 - 56.24 ln (MV)
% Dilatación total	% Mat. Vol. (hasta 28%)	CSA	0.876	D _T = 21.396 (MV) - 323.8
% Dilatación Total	% Mat. Vol. (> 28%)	CSA	-0.474	D _T = 678.83 - 14.174 (MV)
Relación H/C	Relación O/C	CSA	0.549	H/C = 0.623 + 2.758 (O/C)
Poder Calorífico Cal/g	% Cenizas	B.S.	-0.9835	PC = 8676.21 - 95.71 (CZ)
Poder Calorífico Cal/g	% Carbono	BSLCZ	0.8163	PC = 4365.67 + 47.99 (C)
Poder Calorífico Cal/g	% Materia Volátil	BSLCZ	-0.7247	PC = 8942.4 - 13.53 (MV)
% Carbono	% Materia Volátil	BSLCZ	-0.8867	C = 95.348 - 0.2813 (MV)
% Hidrógeno	% Materia volátil	BSLCZ	0.7297	H = 3.910 + 0.0516 (MV)
% Hidrógeno	% Carbono	BSLCZ	-0.773	H = 20.39 - 0.17 (C)
Indice de Molienda (CSA)	% Materia Volátil	BSLCZ	-0.8956	IMH = 159.58 - 2.683 (MV)
% Carbono	% Carbono fijo	SLMM	0.874	C = 70.56 + 0.249 (CF)

nan materia volátil y carbono, en base seca libre de cenizas.

La Figura 64 demuestra la relación entre estos dos parámetros; el coeficiente de correlación obtenido, $r = 0.8867$ era de esperarse, ya que el contenido de materias volátiles, obtenida para los carbones de la zona Checua-Lenguazaque está dada por:

$$\%C (b.s.l.cz) = 95.348 - 0.2813 \times \%MV (b.s. l.cz)$$

6.6.1.2. Materia volátil e hidrógeno.- Uno de los principales constituyentes de la materia volátil es el hidrógeno, entre otros gases combustibles tales como monóxido de carbono, metano y otros hidrocarburos, vapores de alquitrán y gases no combustibles como dióxido de carbono y vapor de agua. De hecho, en general, un aumento de hidrógeno en el carbón corresponde a un aumento en las materias volátiles, tal como lo indica la correlación positiva entre estos dos parámetros ($r = 0.7297$).

La relación lineal entre materias volátiles e hidrógeno, caracterizada por la ecuación: $H = 3.9102 + 0.0516 \times MV$ (Valores en base seca libre de cenizas), se presenta en la Figura 65 y demuestra la lenta pero continua disminución del hidrógeno a medida que disminuye el contenido de volátiles.

El hecho de que presenten variaciones en el contenido de hidrógeno, causadas por las diferentes proporciones y tipos de macerales, disminuye la correlación entre el hidrógeno y las materias volátiles, hasta tal punto que se encuentran dos carbones del mismo porcentaje de volátiles, pero con diferente contenido de hidrógeno.

6.6.1.3. Materia volátil y poder calorífico.-

Es de notar que la correlación de estos dos parámetros cuando se efectúa en base "como se analizó" da muy baja ($r = -0.1697$. Tabla 44), posiblemente el hecho se debe a que estos parámetros responden de una manera muy diferente ante la influencia de otros componentes como la

humedad y la materia mineral. Mientras la correlación de materia volátil con cenizas es prácticamente nula ($r = 0.012$), la del poder calorífico y cenizas, como se discute más adelante, es excelente. Sin embargo, como la parte orgánica del carbón se puede distribuir en materia volátil y carbono fijo y estos dos componentes son los aportadores de energía calorífica, es de esperarse alguna correlación entre los dos parámetros.

Se procede a efectuar regresión lineal en base seca libre de cenizas obteniéndose un aumento del coeficiente de correlación bastante considerable. ($r = -0.7247$). La ecuación que expresa la relación entre la materia volátil y el poder calorífico es:

$$PC (Cal/g.) s.l.cz = 8942.4 - 13.53 MV (s.l.cz.),$$

y se muestra en la Figura 66.

La relación de la materia volátil y el carbono fijo con el poder calorífico, es conocida desde hace muchos años y se han descrito numerosas ecuaciones que predicen el poder calorífico a partir de los datos del análisis proximo. (GOUTAL, 1909; NAKAMURA, 1929; SCHMIT, 1925; SEYLER, SPOONER, MAZUMDAR, 1954; JAIN, 1981, etc).

La ecuación aquí hallada presenta buena correlación, pero indudablemente los resultados se ajustan mucho más con el análisis último, y el porcentaje de carbono podría predecir mucho mejor el poder calorífico que el contenido de materia volátil.

6.6.1.4. Materia volátil e índice de molienda Hardgrove.- (IMH).

Existe una relación general entre el rango y el índice Hardgrove de un carbón, que es de gran interés práctico pues da una guía general de la facilidad de molienda de un carbón de un rango dado. Sin embargo, el rango de un carbón puede no ser un parámetro suficiente para dar un dato exacto. La literatura reporta una relación no lineal, entre índice de molienda Hardgrove y las materias volátiles, mostrando un ascenso rápido hasta un 20 - 25% de M.V. (slcz); a partir de estos valores se registra un descenso marcado

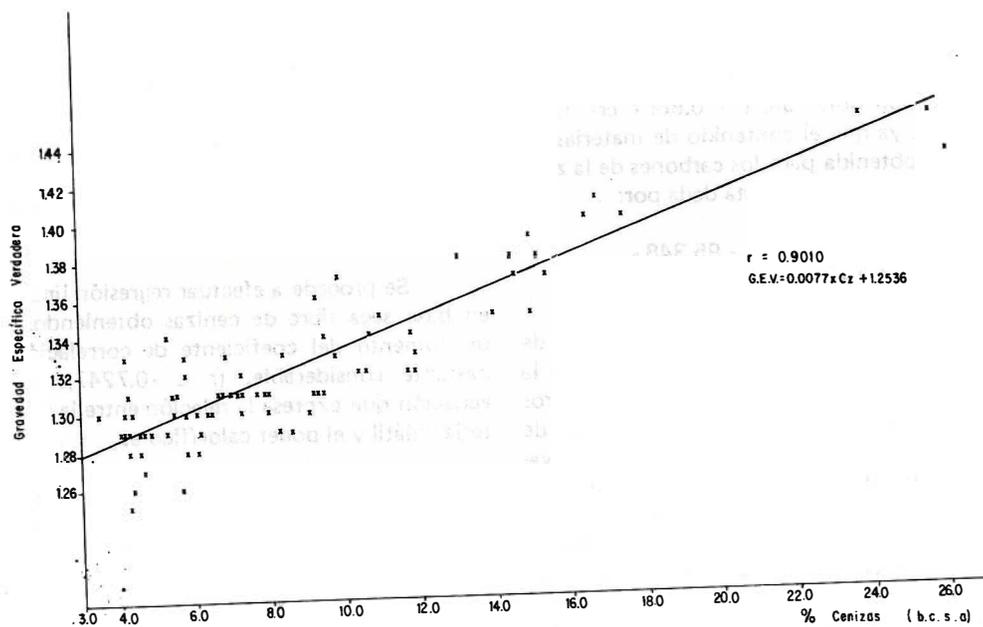


FIG. 63: Variación de la gravedad específica verdadera con el contenido de cenizas en base seca de carbones de la Zona Checua - Lenguaque.

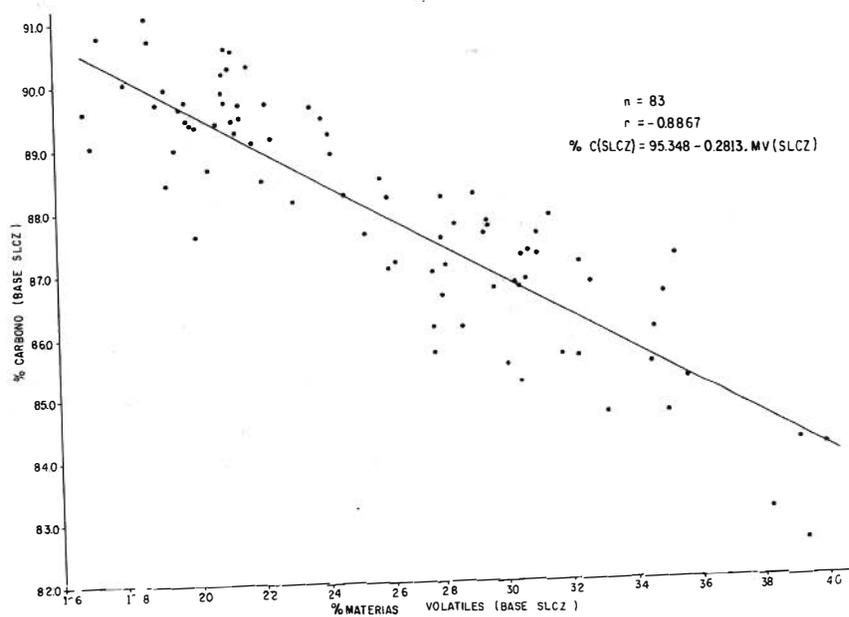


FIG. 64: Relación entre carbono y materias volátiles en muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

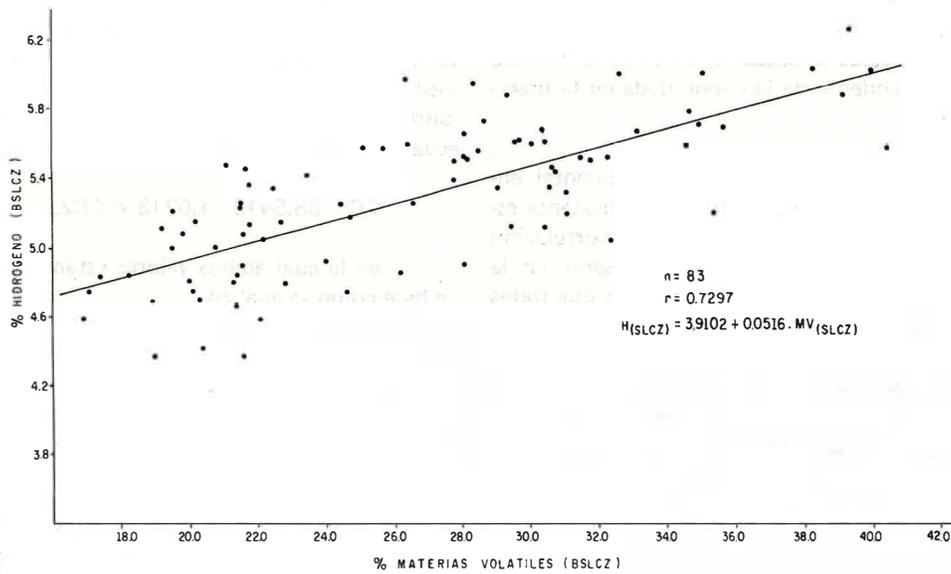


FIG. 65: Relación entre el contenido de materias volátiles (b.s.l.cz.) y el porcentaje de hidrógeno (b.s.l.cz.) en muestras de la Zona Checua - Lenguaque.

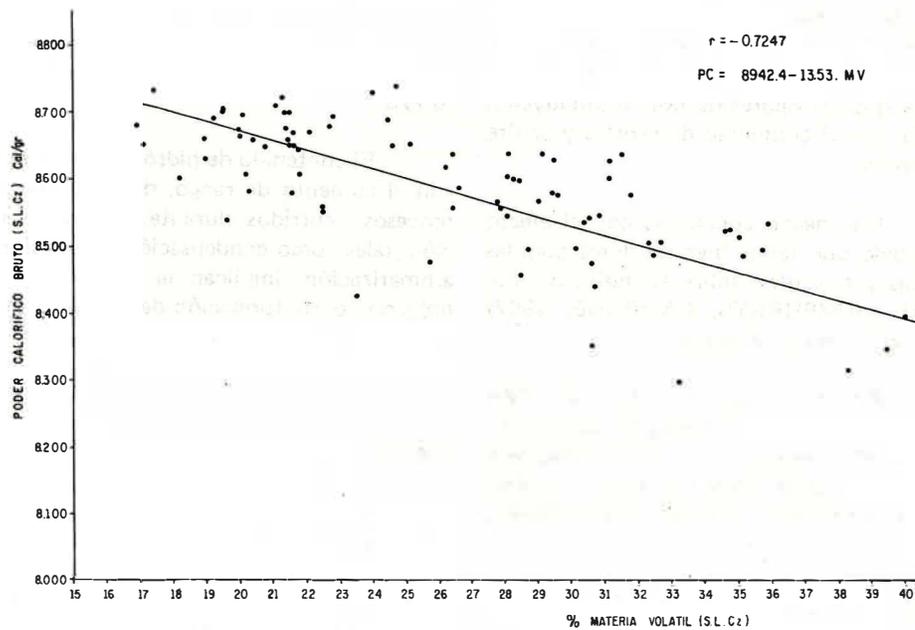


FIG. 66: Correlación entre el porcentaje de materia volátil (s.l.cz.) y el poder calorífico (s.l.cz.) en los carbones de la Zona Checua - Lenguaque.

(LOWRY, 1963); se reporta igualmente una dispersión notable de los datos. Para el caso particular de los carbones de Checu-Lengua-zaque, éstos se ubicarían en la parte máxima y descendente de la curva, dada en la literatura.

La relación lineal experimental encontrada en estos carbones fue bastante estrecha, con un coeficiente de correlación r de -0.8956 , tal como se observa en la Figura 67. Posiblemente debido a que todos son carbones de una misma zona, la dispersión encontrada no es muy grande, aunque se tiene un rango de 16 a 40% de M.V. (slcz). A excepción de la muestra 151413 (GBS-60), que posee un índice de molienda anormalmente alto para su rango, las demás muestras se ajustan bien a la ecuación determinada:

$$I.M.H. (csa) = 159.58 \cdot 2.683 \text{ M.V. (slcz)}.$$

Es de notar que el índice de molienda Hardgrove, además de correlacionar con los parámetros de rango (M.V., PC, C), presenta relación con el contenido de azufre y cenizas como se desprende de los coeficientes de correlación r de -0.56 y -0.50 , respectivamente. Esta correlación negativa indica que los valores de IMH disminuyen a medida que el contenido de cenizas y azufre aumentan.

Este hecho concuerda con el efecto reportado por varios investigadores para las cenizas y el azufre, sobre el índice de molienda (HUMPHREYS, LAWRNCE, 1967) para carbones de este rango.

Fitlon et al., reportan un IMH aproximadamente de 75 para las cenizas del carbón, afirmando que los carbones duros y blandos tenderían hacia este valor a medida que el contenido de cenizas crece (LOWRY, 1963).

6.6.2. CORRELACION ENTRE EL CARBONO ELEMENTAL Y OTRAS VARIABLES

6.6.2.1. Carbono y Cenizas.- La Figura 68 muestra la correlación entre carbono

y cenizas para los carbones de la zona estudiada. El coeficiente obtenido $r = -0.9429$ indica una alta relación lineal entre estos dos parámetros. Se observa que a medida que aumenta el contenido de cenizas disminuye el de carbono, según la siguiente ecuación:

$$\% C = 88.5412 - 1.0213 \times \% Cz,$$

en la cual ambos valores están dados en base como se analizó.

Teniendo en cuenta la estrecha relación del porcentaje de cenizas con el contenido de la materia mineral del carbón, y por otra parte el carbono como el principal elemento constituyente de la parte orgánica, era de esperarse una buena correlación entre ellos, ya que un aumento de la porción inorgánica en el carbón implica una disminución de la materia orgánica.

6.6.2.2. Carbono e hidrógeno.- Se observa en la Figura 69, cómo disminuye el hidrógeno a medida que aumenta el carbono, según la siguiente relación lineal:

$$H = 20.39 - 0.17 \times C \text{ (valores en b.s.l.cz)}, \text{ con un factor de correlación } r = -0.773.$$

El contenido de hidrógeno disminuye con el aumento de rango, debido a que los procesos ocurridos durante la carbonificación, tales como condensación, ciclización y aromatización, implican la pérdida de hidrógeno con la formación de enlaces insaturados y la unión de carbonos terminales, entre otros cambios estructurales.

6.6.2.3. Relación H/C - O/C.- Los principales constituyentes del carbón son los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno. Given, entre otros autores, considera que la forma más efectiva de representar gráficamente los resultados químicos del metamorfismo del carbón es el diagrama de relaciones H/C vs. O/C, introducido por Van Krevelen (GIVEN, 1966) (VAN, KREVELEN, 1961).

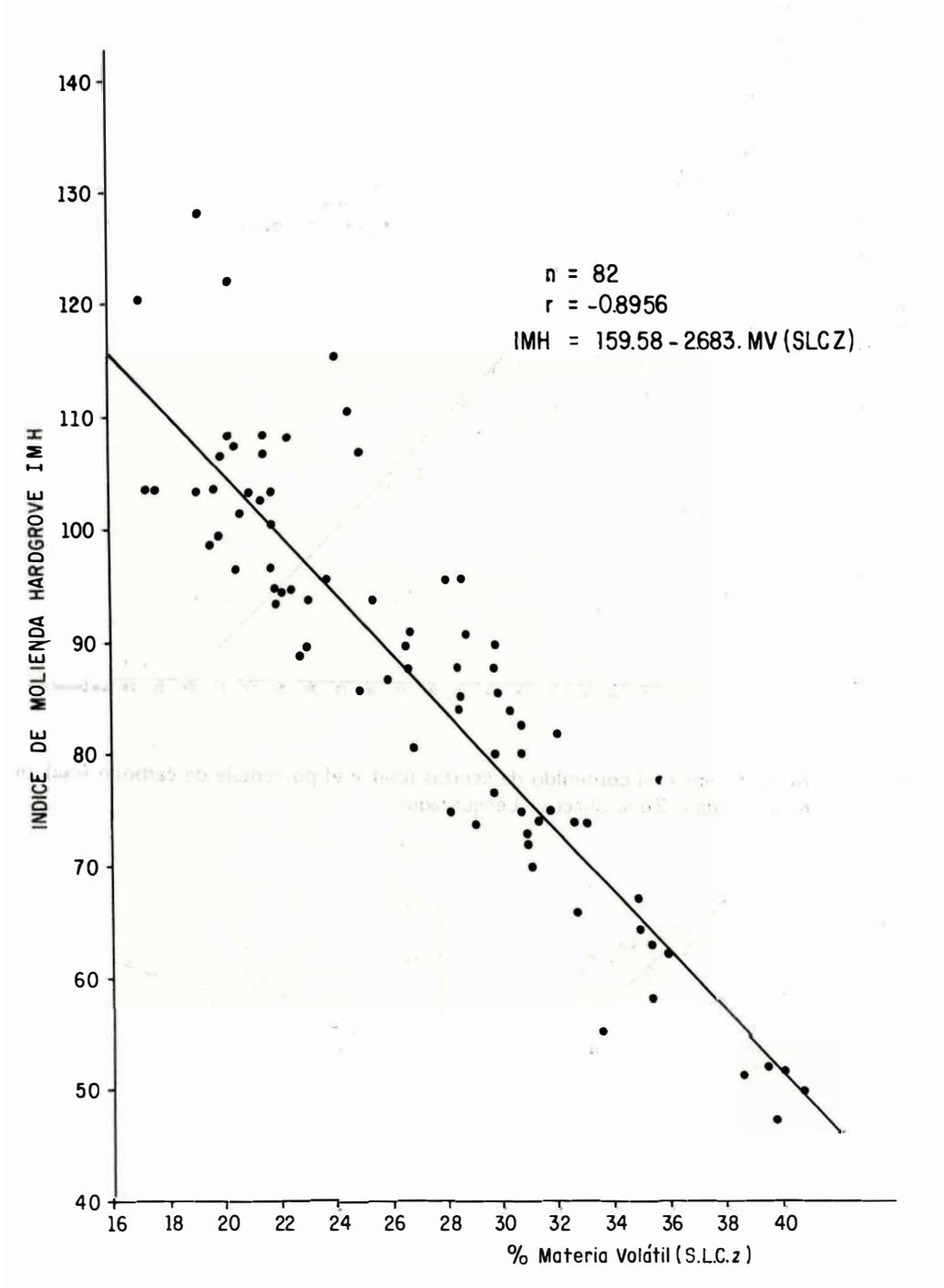


FIG. 67: Correlación entre el contenido de materias volátiles (s.l.cz.) y el índice de molien-
da Hardgrove en carbones de la zona Checua - Lenguazaque.

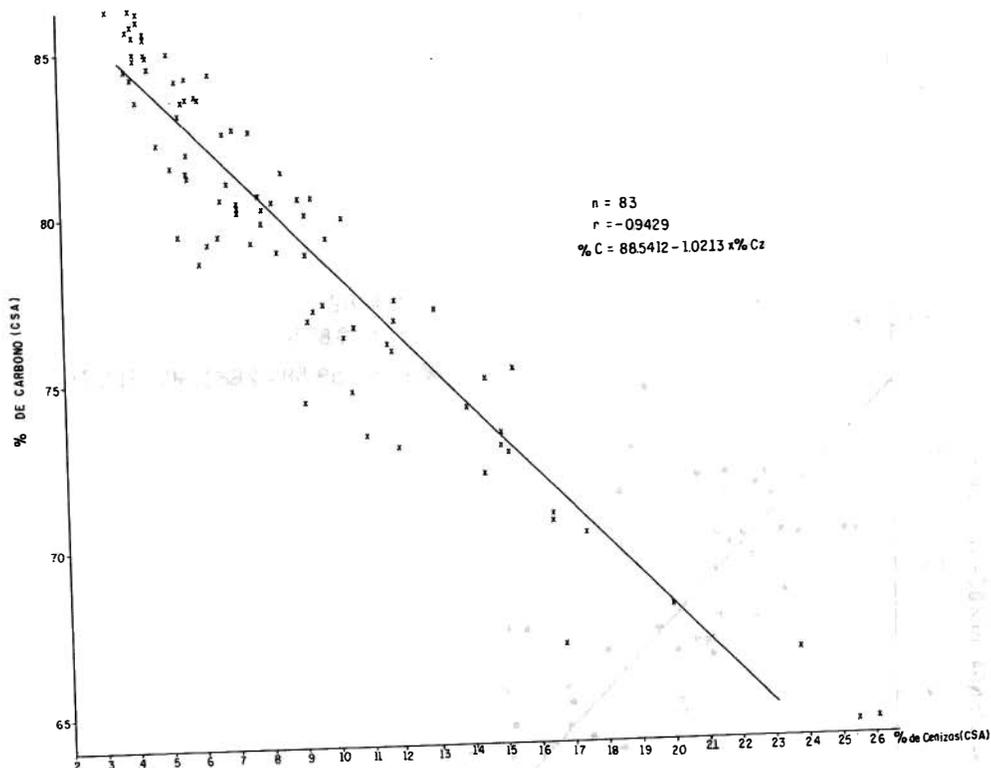
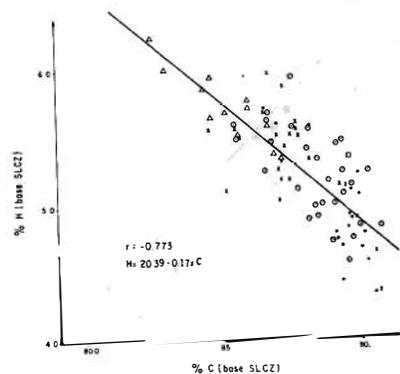
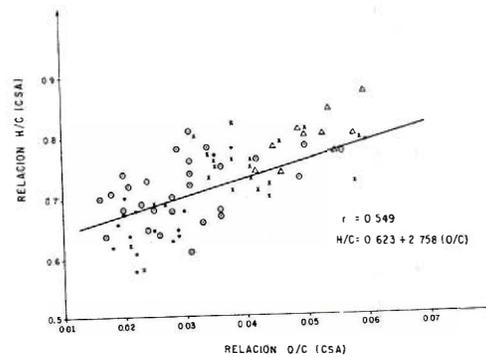


FIG. 68: Relación entre el contenido de cenizas (csa) y el porcentaje de carbono (csa) en muestras de la Zona Checua - Lenguaque.



• Bloque V
 ○ Bloque I
 × Bloque II
 △ Bloque III



• Bloque V
 ○ Bloque I
 × Bloque II
 △ Bloque III

FIG. 69: Relación entre carbono e hidrógeno en carbones de la Zona Checua-Lenguaque.

FIG. 70: Relaciones atómicas H/C vs. O/C.

En la Figura 70 se presenta el diagrama de estas relaciones atómicas, para los carbones de la zona Checua-Lenguazaque. El coeficiente de correlación obtenido $r = 0.549$, es menor que el dado por la relación de carbono e hidrógeno, debido seguramente a que el oxígeno es determinado por diferencia y por lo tanto está afectado por los errores en las determinaciones de los demás elementos.

Se muestra la variación de la carbonificación a través de los bloques estudiados, indicando mayor rango para los del Bloque V y una disminución gradual del grado de metamorfismo hacia el sur del sinclinal.

Esta curva ofrece además otras ventajas: todos los procesos de reacción simple (deshidratación, decarboxilación y demetación) pueden representarse por líneas rectas; el diagrama permite obtener una idea aproximada de la estructura del esqueleto de carbono.

En el caso de someter un carbón a un proceso de carbonificación a nivel de laboratorio bajo temperaturas progresivamente más altas, las composiciones de los productos obtenidos caen aproximadamente en la línea recta que pasa por el origen del diagrama (H/C vs. O/C), y por el punto que representa dicho carbón. Análogamente, si se trata de un carbón alterado térmicamente, cuya composición cae en un punto por debajo de la curva H/C vs. O/C, trazando una línea recta de este punto al origen y determinado el punto en el cual ésta intercepta la curva, puede deducirse en forma aproximada, la composición que tenía dicho carbón antes de ser afectado por la intrusión (SCHOPF, and LONG, 1966).

6.6.2.4. Carbono y poder calorífico. - Siendo el carbono el elemento más importante de la parte orgánica y por consiguiente de la porción combustible del carbón, es de esperarse una estrecha relación entre este y el poder calorífico.

Las fórmulas de Dulong - Petit, Mott Spooner, Grummel - Davies y Subramaniam

entre otras, utilizadas para predecir la energía calorífica de un carbón dado, están basadas justamente en la relación del poder calorífico con los resultados del análisis elemental (SUBRAMANIAM, 1978; GIVEN, and YARZAB, 1975).

El coeficiente de correlación obtenido para estas dos variables, dadas en base seca libre de cenizas es de 0.8163, e indica en general un aumento en el valor calorífico a medida que crece el contenido de carbono, como se observa en la Figura 71. Sin embargo, como es conocido, los parámetros de rango varían de forma diferente según el grado de metamorfismo. Para el caso de los carbones estudiados (bituminosos alto a bajo volátil), se tiene una mayor variación en el carbono que la presentada por los valores de poder calorífico; el carbono aumenta de forma más o menos continua, mientras que el poder calorífico varía muy poco alrededor del máximo valor de la serie de carbonificación (TEICHMULLER, M. and TEICHMULLER, R., 1966). Efectivamente, el poder calorífico dado en b.s.l.cz., es el parámetro que presenta el menor coeficiente de variación.

Por otra parte, también puede contribuir a la dispersión de los datos el hecho de que el resultado de carbono incluya el carbono proveniente de carbonatos.

Tanto el poder calorífico como el carbono son notablemente afectados por la presencia de materia mineral, como se deduce de las respectivas correlaciones con cenizas; $r = -0.9835$ para el primero y -0.9429 para el segundo. Así que las variaciones debidas al contenido de cenizas, pueden enmascarar las causadas por las diferencias en rango, y explican el alto coeficiente de correlación $r = 0.9813$, entre estas dos variables dadas en base como se analizó. La Figura 72 muestra esta correlación y, como se había anotado es factible esperar mejor precisión en el cálculo del poder calorífico; con base en el contenido de carbono, que a partir de otros parámetros de rango.

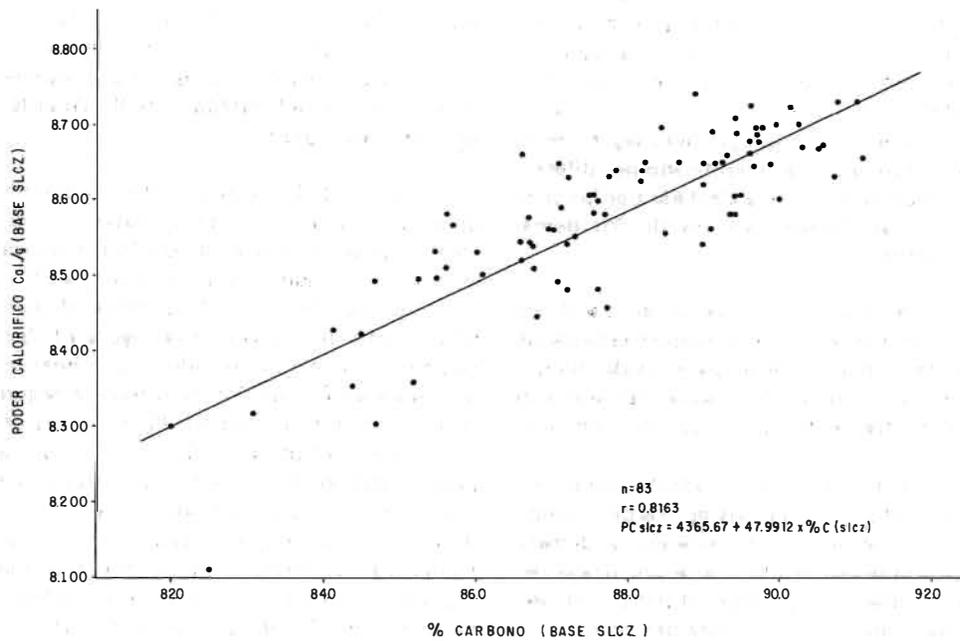


FIG. 71: Relación entre Carbono (b.s.l.cz.) y poder calorífico (b.s.l.cz.) en muestras de la Zona Checua-Lenguazaque.

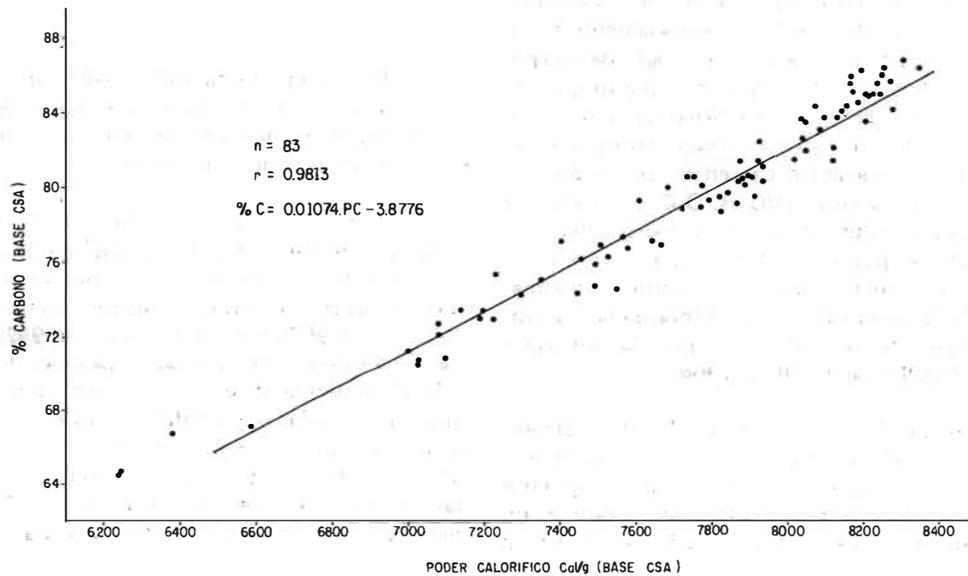


FIG. 72: Correlación entre poder calorífico y contenido de carbono en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

6.6.3. RELACION DE LAS CENIZAS CON EL PODER CALORIFICO

Uno de los coeficientes de correlación más altos, obtenidos en el análisis de regresión lineal, es el de poder calorífico y cenizas. Es bien conocida la interdependencia de estos dos parámetros, como lo asevera el hecho de que casi siempre en la comercialización se penalice por el mayor contenido de cenizas o el menor poder calorífico, a partir de un nivel dado fijado por el comprador. La ecuación obtenida para los dos parámetros con base seca es:

$$PC = 8676.21 - 95.71 \times Cz$$

Esta ecuación nos indica, que en general para la zona Checua-Lenguazaque, se obtiene un descenso del poder calorífico de aproximadamente 96 calorías por cada aumento de un 1% en las cenizas. El valor del intercepto en la ecuación nos daría la barrera natural del caso hipotético de un carbón que no contuviera materia mineral.

La ecuación obtenida, dado el alto coeficiente de correlación $r = -0.9835$, proporciona un medio efectivo de control del análisis para estos dos parámetros. La Figura 73 es la representación gráfica en coordenadas del poder calorífico y el contenido de cenizas con base seca.

6.6.4. CORRELACION DE LA HUMEDAD RESIDUAL

Los coeficientes de correlación más altos, cuando se relaciona la humedad residual con los parámetros, se presentan con los valores de humedad de equilibrio e índice de hinchamiento; por tanto se centra la discusión en estos parámetros.

6.6.4.1. Humedad residual y humedad de equilibrio.- El secado parcial al aire que sufre la muestra en la etapa de preparación, elimina buena parte de la humedad superficial, y su fin primordial es equilibrar la muestra con la atmósfera del sitio de preparación, para prevenir pérdidas de humedad en la molienda (REES, 1966). Es de esperarse entonces alguna relación entre la capacidad del

carbón de retener humedad a una atmósfera de humedad relativa muy alta (humedad de equilibrio) y el valor que contenga la muestra que se ha equilibrado en las condiciones del ambiente local (humedad residual).

La correlación hallada para las dos determinaciones, es de 0.6944, y la ecuación que relaciona los dos parámetros es:

$$HE = 0.6974 \cdot HR + 0.8211$$

Sin embargo, aunque los datos guardan la tendencia general, tal que un aumento de humedad de equilibrio se refleja en un aumento de humedad residual, la dispersión como puede apreciarse en la Figura 74, es grande.

6.6.4.2. Humedad residual e índice de hinchamiento.- BERKOWITZ (1949, 1950), describe la relación entre la humedad seca al aire y el índice de hinchamiento o índice de aglutinación, con mención sobre todo a carbones ingleses; concluye que la única propiedad que puede ser correlacionada con el índice de hinchamiento, es la humedad de equilibrio, y que los índices de hinchamiento y aglutinación de carbones de igual contenido de humedad, son proporcionales a su contenido de materia volátil (FRANCIS, 1954).

En el presente estudio el hecho notado por Berkowitz también se detecta, pues los dos coeficientes más altos obtenidos del índice de hinchamiento, son con la humedad residual y la humedad de equilibrio.

La Figura 75 (en: FRANCIS, 1969) reportada igualmente por Berkowitz, muestra la relación de la humedad seca al aire con el índice de hinchamiento. La Figura 76 muestra la recta experimental de relación de los dos parámetros, ajustados por mínimos cuadrados para la zona Checua-Lenguazaque. Comparando ésta con la obtenida por Berkowitz, vemos bastante similitud en la parte de la curva que corresponde al rango de humedad obtenido (aproximadamente 0.5 - 2%). En ambas se observa una disminución del índice de hinchamiento de 9 a 4 aproximadamente.

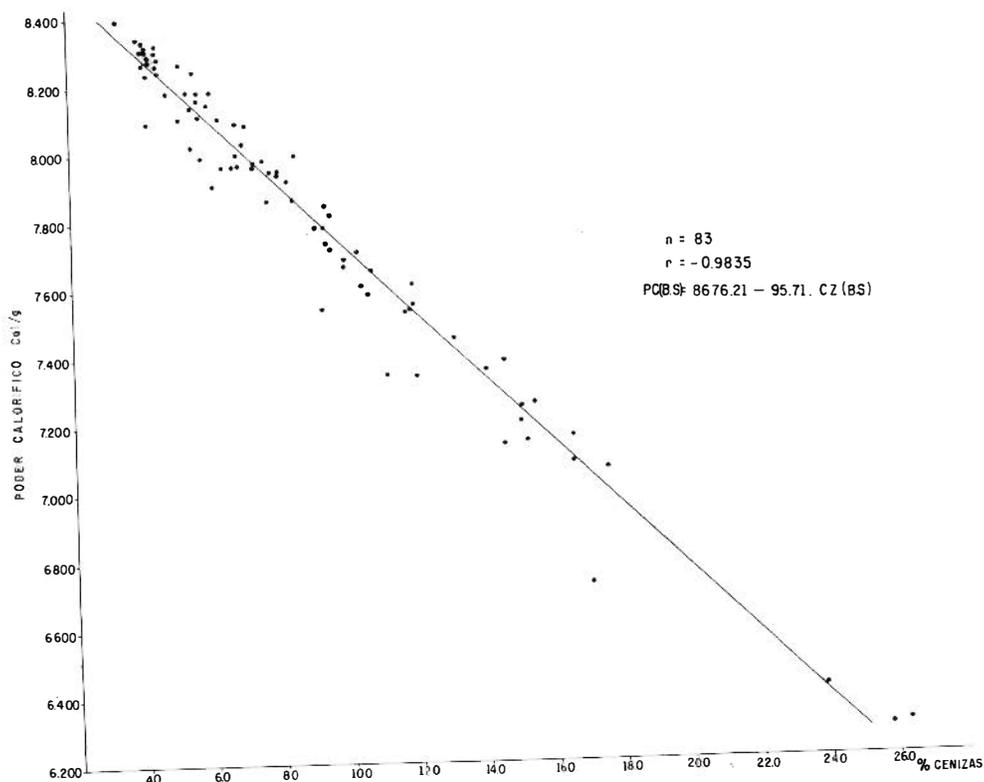


FIG. 73: Relación entre el contenido de cenizas (Base seca) y el poder calorífico (Base seca) en muestras de la zona Checua - Lenguazaque.

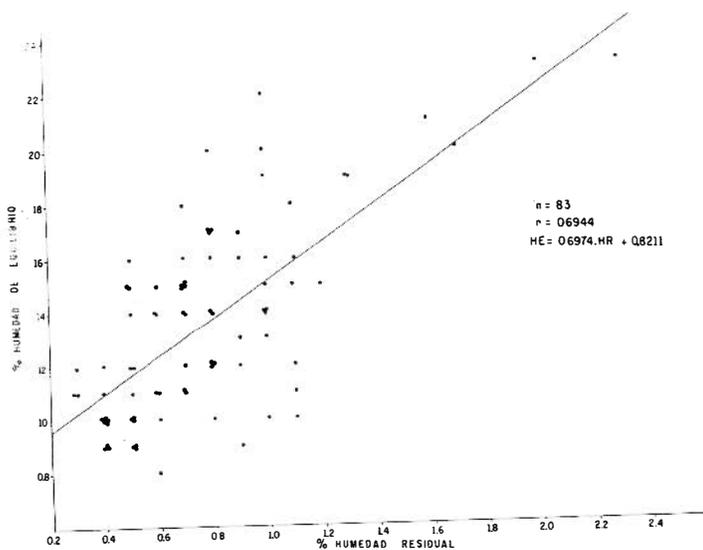


FIG. 74: Relación entre la humedad de equilibrio y la humedad residual en muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

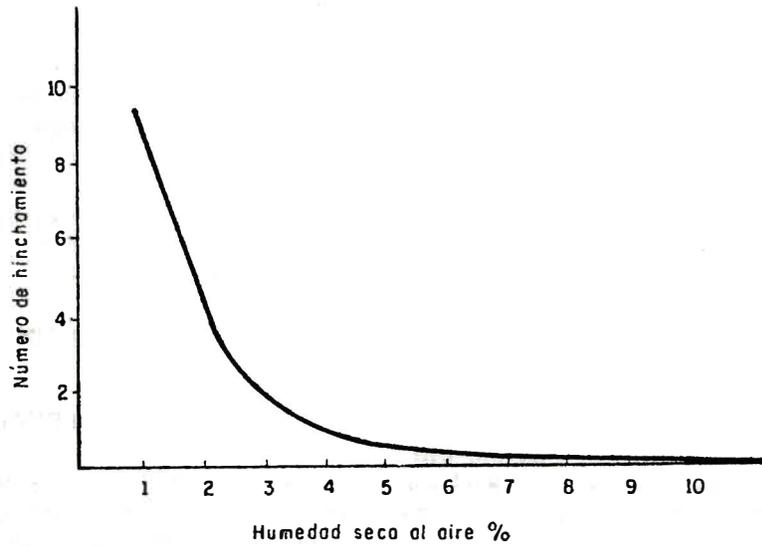


FIG. 75: Variación del número de hinchamiento con el contenido de humedad seca al aire (Tomada de FRANCIS W., 1969).

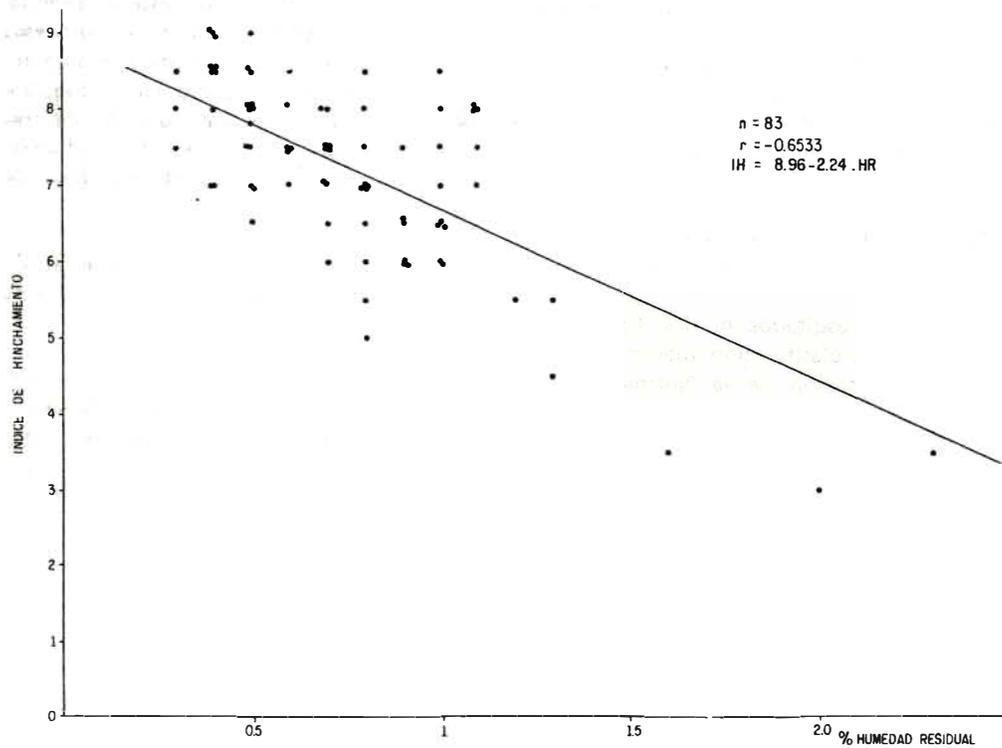


FIG. 76: Relación entre el índice de hinchamiento y el contenido de humedad en las muestras de la Zona Checua · Lenguazaque.

La ecuación de la recta obtenida es:

$$IH = 8.96 \cdot 2.24 \cdot HR$$

Los datos tienen una correlación de -0.653.

7. CLASIFICACION DE LOS CARBONES DEL SINCLINAL CHECUA-LENGUAZAQUE

Es un hecho que a nivel nacional las clasificaciones más conocidas y comúnmente utilizadas son la Internacional de Carbones Duros por Tipo y la de la American Society For Testing and Materials, A.S.T.M. Estas dos clasificaciones tienen como base el análisis próximo y algunos otros ensayos complementarios.

Dados algunos inconvenientes o imprecisiones de estas clasificaciones, la tendencia general a nivel mundial es utilizar la petrografía como método más apropiado para determinar el rango y tipo de los carbones (E.C.E., 1983). Como hasta la fecha no se cuenta con los análisis petrográficos de estas muestras (estudio en progreso), se limita la discusión a las dos clasificaciones ya mencionadas.

7.1. CLASIFICACION A.S.T.M. DE CARBONES POR RANGO

Los resultados de las Tablas 46 y 47 para esta clasificación fueron obtenidos con la aplicación de la Norma A.S.T.M. D 388-77 aplicada a este fin.

Para facilitar la comparación de los diferentes bloques de la zona se llevaron a la Figura 77 los resultados de las Tablas 46 y 47. Se observa la disminución de rango desde el Bloque V hacia el III.

En el Bloque V, Nivel TKg2, el 93% de los carbones son bituminosos, bajos volátiles y 7% bituminosos medios volátiles. En ese mismo bloque el 100% de las muestras clasifican como bituminosos medios en volátiles para el Nivel TKg3; esto ya nos mues-

tra una disminución de rango del Nivel TKg2 al TKg3.

En el Bloque I la repartición es 75% de bajos en volátiles y 25% de medios para el Nivel TKg2 y 90% de medios volátiles y 10% de bajos volátiles para el Nivel TKg3.

En los bloques II y III predominan los medios volátiles en el Nivel TKg2 y los altos volátiles en el Nivel TKg3.

Estos resultados se resumen en la Tabla 48.

7.2. CLASIFICACION INTERNACIONAL

Además de utilizar el contenido de materia volátil o el poder calorífico como parámetros indicadores de rango, esta clasificación incluye otros ensayos tendientes a dar una idea del carbón en cuanto a su comportamiento en combustión y coquización. Así el índice de hinchamiento daría la respuesta del carbón ante un calentamiento muy rápido (como en los procesos de combustión) y la dilatometría ante un calentamiento lento (como en la coquización). Una cifra para cada uno de los tres parámetros (MV o PC, índice de hinchamiento y dilatación) da el código numérico de clasificación del carbón.

Las Tablas 46 y 47 muestran el número código para cada uno de los carbones estudiados de la zona.

Algunos números código se encuentran entre paréntesis debido al contenido alto de cenizas de los carbones, los que pueden modificar el valor de los parámetros de clasificación. En este caso la clasificación definitiva de tales muestras se reporta en el capítulo de Lavabilidad donde se cuenta con los valores de las determinaciones de los carbones que cumplen el requisito de tener un porcentaje de cenizas menor de 10.

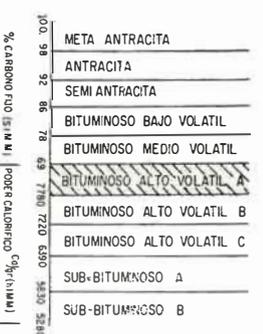
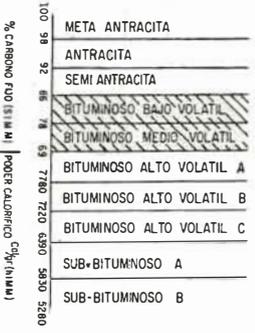
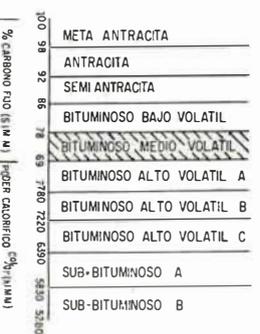
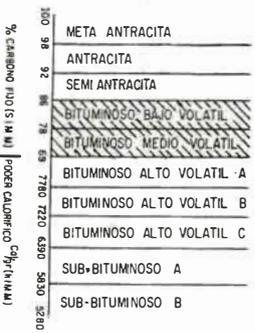
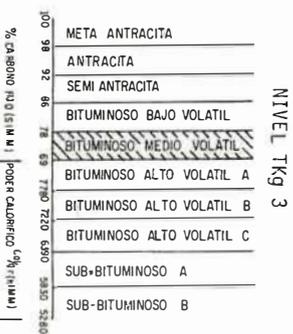
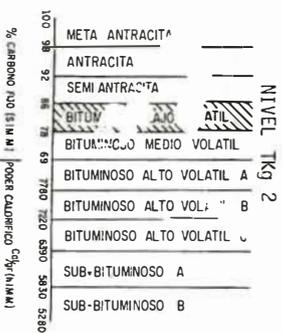
Para mayor facilidad de visualización se ubican los números código predominantes para cada bloque, en la representación tradicional de la Clasificación Internacional. Figuras 78 y 79.

TAB. 46: Clasificación de los carbones de la Zona Checua - Lenguaque Bloques V y I

Identificación No. INGEOMINAS	No. de Campo GBS	Clasificación A.S.T.M.	Clasificación Internacional	Identificación No. INGEOMINAS	No. de Campo GBS	Clasificación A.S.T.M.	Clasificación Internacional
BLOQUE V NIVEL TKg2				BLOQUE V NIVEL TKg3			
151394	41	II Bit. Med. Vol.	435	151409	56	II Bit. Med. Vol.	(435)
151395	42	Bit. Med. Vol.	332	151410	57	Bit. Med. Vol.	435
151396	43	Bit. Bajo Vol.	334	151411	58	Bit. Med. Vol.	(434)
151397	44	Bit. Bajo Vol.	433	151412	59	Bit. Med. Vol.	(535)
151398	45	Bit. Bajo Vol.	434				
151399	46	Bit. Bajo Vol.	434				
151400	47	Bit. Bajo Vol.	434				
151401	48	Bit. Bajo Vol.	435				
151402	49	Bit. Bajo Vol.	(433)				
151408	55	Bit. Bajo Vol.	434				
151433	80	Bit. Bajo Vol.	331				
151434	81	Bit. Bajo Vol.	334				
151435	82	Bit. Bajo Vol.	333				
151436	83	Bit. Bajo Vol.	333				
BLOQUE I NIVEL TKg2				BLOQUE I NIVEL TKg3			
151354	1	II Bit. Bajo Vol.	333	151367	14	II Bit. Med. Vol.	535
151355	2	Bit. Bajo Vol.	332	151368	15	Bit. Med. Vol.	(535)
151356	3	Bit. Bajo Vol.	332	151369	16	Bit. Med. Vol.	535
151413	60	Bit. Bajo Vol.	332	151370	17	Bit. Med. Vol.	(535)
151414	61	Bit. Bajo Vol.	433	151371	18	Bit. Med. Vol.	535
151415	62	Bit. Bajo Vol.	434	151372	19	Bit. Med. Vol.	(535)
151416	63	Bit. Bajo Vol.	334	151381	28	Bit. Med. Vol.	534
151417	64	Bit. Bajo Vol.	434	151382	29	Bit. Med. Vol.	(535)
151418	65	Bit. Med. Vol.	434	151382	29	Bit. Med. Vol.	435
151419	66	Bit. Med. Vol.	(434)	151384	31	Bit. Bajo Vol.	(433)
151420	67	Bit. Med. Vol.	433				
151421	68	Bit. Bajo Vol.	433				
151422	69	Bit. Bajo Vol.	(433)				
151426	73	Bit. Bajo Vol.	433				
151427	74	Bit. Bajo Vol.	433				
151428	75	Bit. Bajo Vol.	(433)				
151429	76	Bit. Bajo Vol.	434				
151430	77	Bit. Bajo Vol.	(432)				
151431	78	Bit. Med. Vol.	435				
151432	79	Bit. Med. Vol.	(435)				

TAB. 47: Clasificación de los Carbones de la Zona Checua - Lenguazaque. BLOQUES II y III.

Identificación No. INGEOMINAS	No. de Campo GBS	Clasificación A.S.T.M.	Clasificación Internacional	Identificación No. INGEOMINAS	No. de Campo GBS	Clasificación A.S.T.M.	Clasificación Internacional
BLOQUE II NIVEL TKg2				BLOQUE II NIVEL TKg3			
151373	20	II. Bit. Med. Vol.	534	151363	10	II. Bit. Alto Vol. A	535
151374	21	Bit. Med. Vol.	535	151377	24	Bit. Med. Vol.	535
151375	22	Bit. Med. Vol.	535	151390	37	Bit. Alto Vol. A	534
151376	23	Bit. Med. Vol.	535	151391	38	Bit. Alto Vol. A	635
151378	25	Bit. Med. Vol.	535	151393	40	Bit. Alto Vol. A	634
151379	26	Bit. Med. Vol.	(535)	151403	50	Bit. Alto Vol. A	635
151380	27	Bit. Med. Vol.	435				
151385	32	Bit. Bajo Vol.	433				
151386	33	Bit. Bajo Vol.	332				
151387	34	Bit. Bajo Vol.	434				
151388	35	Bit. Bajo Vol.	434				
151389	36	Bit. Bajo Vol.	434				
151392	39	Bit. Med. Vol.	(635)				
151404	51	Bit. Med. Vol.	534				
151405	52	Bit. Med. Vol.	535				
151406	53	Bit. Med. Vol.	535				
151407	54	Bit. Med. Vol.	(535)				
BLOQUE III NIVEL TKg2				BLOQUE III NIVEL TKg3			
151362	9	II. Bit. Alto Vol. A	(622)	151357	4	II. Bit. Alto Vol. A	634
151366	13	Bit. Alto Vol. A	635	151358	5	Bit. Alto Vol. A	(622)
151423	70	Bit. Med. Vol.	(534)	151359	6	Bit. Alto Vol. A	(623)
151424	71	Bit. Med. Vol.	533	151360	7	Bit. Alto Vol. A	635
151425	72	Bit. Med. Vol.	434	151361	8	Bit. Alto Vol. A	635
				151364	11	Bit. Med. Vol.	535
				151365	12	Bit. Alto Vol. A	535



F G 77 Ubicación de los carbones de los diferentes bloques y niveles de la Zona Checua
Lenguazaque dentro de la clasificación por rango A.S.T.M

TAB. 48: Clasificación A.S.T.M. en porcentajes.

		BIT. BAJO VOL.	BIT. MED. VOL.	BIT. ALTO VOL. A
BLOQUE V	TKg 2	93	7	0
	TKg 3	0	100	0
BLOQUE I	TKg 2	75	25	0
	TKg 3	10	90	0
BLOQUE II	TKg 2	29	71	0
	TKg 3	0	17	83
BLOQUE III	TKg 2	0	60	40
	TKg 3	0	14	86

TAB. 49: Distribución en porcentajes de los carbones de la Zona Checua-Lenguazaque en la clasificación internacional.

		331	332	333	334	434	435	534	535	433	533	632	633	634	635
		De vapor, coquizante. Bajos volátiles				Coquizantes de 1a. Clase				Med. Vol. altera- dos por el calor	Altos Vol. aglom. Interm.	Altos vol. fuertemente Aglomerantes			
BLOQUE V	N2	7	7	14,5	7	43	14,5	—	—	7	—	—	—	—	—
	N3	—	—	—	—	—	50	—	50	—	—	—	—	—	—
BLOQUE I	N2	—	15	5	5	25	20	—	5	25	—	—	—	—	—
	N3	—	—	—	—	10	20	10	60	—	—	—	—	—	—
BLOQUE II	N2	—	6	—	—	17	6	12	47	6	—	—	—	—	6
	N3	—	—	—	—	—	—	17	33	—	—	—	—	17	33
BLOQUE III	N2	—	—	—	—	20	—	—	20	—	20	—	20	—	20
	N3	—	—	—	—	—	—	—	29	—	—	14	—	29	29
TOTAL		1	6	4	2	19	13	5	27	9	1	1	1	4	7
		1	12				64				10	1	12		

F G 78 Ubicación de los carbonos de los diferentes bloques y niveles de la zona a Checu Lenguaqu de la clasificación internacional 1. Bloques V y 1.

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3	435 535 635									5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
		211 311 411 511 611 711 811									1	S - C
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N.A.
Nº Clase	—	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(SicZ)		> 3	> 10	> 14	> 14	> 20	> 28	> 33	> 33	> 33	> 33	
P.C Col/gr		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	hlcZ

BLOQUE V NIVEL TKg 2

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3	435 535 635									5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
		211 311 411 511 611 711 811									1	S - C
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N.A.
Nº Clase	—	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(SicZ)		> 3	> 10	> 14	> 14	> 20	> 28	> 33	> 33	> 33	> 33	
P.C Col/gr		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	hlcZ

BLOQUE I NIVEL TKg 2

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3	435 535 635									5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
		211 311 411 511 611 711 811									1	S - C
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N.A.
Nº Clase	—	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(SicZ)		> 3	> 10	> 14	> 14	> 20	> 28	> 33	> 33	> 33	> 33	
P.C Col/gr		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	hlcZ

BLOQUE V NIVEL IKg 3

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3	435 535 635									5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
		211 311 411 511 611 711 811									1	S - C
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N.A.
Nº Clase	—	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(SicZ)		> 3	> 10	> 14	> 14	> 20	> 28	> 33	> 33	> 33	> 33	
P.C Col/gr		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	hlcZ

BLOQUE I NIVEL TKg 3

F G 79: Ubicación de los carbones de los diferentes bloques y niveles de la Zona Che Lengua de dent o de la clasificación e acio Bloques y

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3										5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N. A.
Nº Clase		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(Sicr)		> 30	> 10-14	> 14-20	> 20-28	> 28-33	> 33	> 33	> 33	> 33		
P.C Col/gr		-	-	-	-	-	7750	7750	7750	7750	7750	hicz

BLOQUE II NIVEL TKg 2

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3										5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N. A.
Nº Clase		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(Sicr)		> 30	> 10-14	> 14-20	> 20-28	> 28-33	> 33	> 33	> 33	> 33		
P.C Col/gr		-	-	-	-	-	7750	7750	7750	7750	7750	hicz

BLOQUE III NIVEL TKg 2

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3										5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N. A.
Nº Clase		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(Sicr)		> 30	> 10-14	> 14-20	> 20-28	> 28-33	> 33	> 33	> 33	> 33		
P.C Col/gr		-	-	-	-	-	7750	7750	7750	7750	7750	hicz

BLOQUE II NIVEL TKg 3

INDICE DE HINCHAMIENTO	Nº GRUPO	NUMERO CODIGO									Nº SUB GRUPO	% DILATACION
> 4	3										5	> 140
		334 434 534 634									4	> 50-140
		333 433 533 633 733									3	> 0-50
2 1/2	4	332 432 532 632 732 832									2	≤ 0
		323 423 523 623 723 823									3	> 0-50
		322 422 522 622 722 822									2	≤ 0
1-2	1	321 421 521 621 721 821									1	S - C
		212 312 412 512 612 712 812									2	≤ 0
0-1/2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	0	N. A.
Nº Clase		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
M.V(Sicr)		> 30	> 10-14	> 14-20	> 20-28	> 28-33	> 33	> 33	> 33	> 33		
P.C Col/gr		-	-	-	-	-	7750	7750	7750	7750	7750	hicz

BLOQUE III NIVEL TKg 3

Es de resaltar que un 64% de los carbones de la zona pertenecen a los "coquizantes de la primera clase" (prime coals) según el criterio de la Clasificación de la National Coal Board (NATIONAL COAL BOARD, 1964), tal como se puede apreciar en los porcentajes de la Tabla 49.

La muestra 151433 (GB-S 80) está clasificada con el número código 331, éste no se encuentra explícitamente contemplado en la representación tradicional de la clasificación, puesto que no es común encontrar un carbón con buenas características de hinchamiento ($I_H = 7$) y prácticamente nulas las propiedades de dilatación (solo contracción). Sin embargo en un estudio correlativo de los parámetros de aglomeración, Van Krevelen reporta una curva de % dilatación contra índice de hinchamiento (VAN KREVELEN, 1961). Dicha curva muestra que puede obtenerse hinchamientos de 0 a 8 con dilataciones prácticamente nulas en carbones de menos de 28% de materias volátiles.

Dentro del contexto de los carbones de la zona, una explicación de la clasificación anómala de este carbón estaría en la oxidación de la muestra, tal como lo indica el alto contenido de oxígeno (el mayor en el Bloque V, Nivel TKg2!). La dilatometría se revela más sensible a los cambios por oxidación que el índice de hinchamiento, que puede con algunos grados de oxidación, no revelar ningún cambio.

Prácticamente todos los carbones estudiados presentan propiedades aglomerantes, algunos en exceso, siendo carbones óptimos para coquizar solos, o bien para obtener mezclas que produzcan un coque de muy buena calidad.

8. ANALISIS QUIMICO Y FUSIBILIDAD DE CENIZAS

8.1. OBJETIVOS

8.1.1. ESTUDIO DE LA COMPOSICION DE LAS CENIZAS

La ceniza, residuo de la materia mineral, al quemar el carbón, suele pasar a tra-

vés de todo el proceso de utilización de éste. Es por ello que entre los parámetros con base en los cuales se evalúa la calidad del carbón existen algunos que se refieren a las propiedades de las cenizas.

Puesto que la ceniza puede en algunos casos representar un porcentaje apreciable del carbón (hasta 40%), es evidente la necesidad de entender su naturaleza y comportamiento para poder darle un uso adecuado a éste, bien sea para generar energía, en coquización o en los procesos de gasificación y licuefacción.

Se sabe que la calidad del coque está relacionada con su contenido de cenizas y azufre, los que a su vez dependen de la composición mineral del carbón. Además se cree que los constituyentes inorgánicos del carbón, pueden tener un efecto marcado en el rendimiento de productos de carbonización y en la estructura, fuerza y reactividad del coque resultante (JENKINS, 1978) En cuanto a esta última, se ha establecido que la presencia de compuestos inorgánicos (álcalis, sales de hierro) en el coque puede ser ventajosa ya que actúan como catalizadores de la reacción de Boudovard: $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO + 40.6 \text{ Kcal/mol}$ (LOISON, *et al*, 1970; CIASCHI, 1979).

En el aprovechamiento térmico, la materia mineral puede, dependiendo de su composición, causar problemas de escoriación, formación de depósitos obstructivos y corrosión.

Por otra parte, desde el punto de vista positivo, las cenizas pueden emplearse como material de relleno para construcción y como fuente de materiales refractarios dependiendo de su composición y de la cantidad disponible (BARBOSA, 1971).

Las consideraciones anteriores justifican ampliamente un estudio cuidadoso de la composición química de las cenizas dentro del proyecto de caracterización de carbones.

El objetivo de esta parte del estudio es, no solo establecer la composición de las

cenizas de los carbones de la zona, sino también determinar parámetros de calidad relativos a estas. Por otra parte, se pretende correlacionar la composición química con las propiedades que tienen que ver con el comportamiento en procesos de combustión con el fin de dar un primer paso hacia su predicción, la cual evitaría ensayos largos y costosos.

8.1.2. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE FUSIBILIDAD

Durante los procesos de utilización de carbon, las cenizas son sometidas a altas temperaturas con su consiguiente ablandamiento y fusión.

Puesto que la ceniza es una mezcla de muchas sustancias no puede esperarse que tenga un punto de fusión único; su comportamiento al fundirse se caracteriza por varias temperaturas: de deformación, de ablandamiento, hemisférica y de fluidez.

De un carbón a otro la composición de la ceniza puede variar considerablemente, de manera que sus temperaturas de fusión pueden variar también de la misma forma. Según que estas temperaturas sean altas o bajas, el carbón puede adecuarse bien a un sistema de remoción de cenizas sólidas, o bien a uno de remoción de cenizas fluídas.

De lo anterior se deriva la importancia del estudio de la fusibilidad de las cenizas dentro de este proyecto, con el objetivo de lograr información que permita prever su comportamiento durante cualquier operación en particular.

8.2. METODOLOGIA

8.2.1. OBTENCION DE CENIZAS

La muestra de carbón pulverizada a malla 60 se calentó a mechero y se introdujo luego a la mufla a 750°C durante una hora.

8.2.2. ANALISIS QUIMICO DE LAS CENIZAS

Se efectuó el análisis de silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y po-

tasio por absorción atómica luego de ataque con ácido fluorhídrico y dilución en ácido bórico según método estandarizado en Ingeominas (CEDEÑO *et al.*, 1979).

El análisis de fósforo y titanio se efectuó por colorimetría luego de ataque por fusión con meta y tetraborato de litio (SHAPIRO, 1975). La determinación de azufre se efectuó empleando método instrumental con detección por infrarrojo (ver numeral 4.2).

8.2.3. DETERMINACION DE FUSIBILIDAD DE CENIZAS

Las temperaturas de fusión de las cenizas se determinaron mediante método empírico según Norma A.S.T.M. D1857, que se basa en la fusión gradual de un cono de ceniza al ser calentado bajo atmósfera controlada y a una velocidad gradual. El cono se observa durante el calentamiento y se reportan las siguientes temperaturas: 1) de deformación inicial, 2) de ablandamiento ($H = W$), 3) hemisférica ($H = W/2$) y 4) de fluidez.

8.2.4. CALCULO DE PARAMETROS DE CARACTERIZACION

Con base en los resultados de las determinaciones efectuadas según 8.2.2, se calcularon los siguientes parámetros:

Porcentaje de Bases:

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{MgO} + \% \text{CaO} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O}$$

Porcentaje de Acidos:

$$\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2$$

Relación Base-Acido:

$$\% \text{Bases} / \% \text{Acidos}$$

Relación Sílica:

$$\% \text{SiO}_2 / \% \text{SiO}_2 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO}$$

Relación Dolomita:

$$\% \text{CaO} + \% \text{MgO} / \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O}$$

Relación Silicio-Aluminio:

$$\% \text{SiO}_2 / \% \text{Al}_2\text{O}_3$$

8.2.5 CLASIFICACION DE LAS CENIZAS

Se clasificaron las cenizas en dos tipos así: cenizas ligníticas, aquellas en las cuales el % de Fe_2O_3 es menor que la suma de % CaO y % MgO y cenizas bituminosas, aquellas en que ocurre lo contrario. Esto, con base en la clasificación usual que se emplea con propósitos técnicos (WINEGARTNER, 1974). Se aclara que esta clasificación se refiere solo a la ceniza y no está relacionada con el tipo de carbón del cual proviene.

8.2.6. CALCULO DE FACTORES DE SLAGGING Y FOULING (Deposición y Encostramiento)

8.2.6.1. Cenizas bituminosas.- Para este tipo de cenizas se calculó el factor de Slagging empleando la fórmula de Atting y Duzy:

$$\text{Factor de Slagging} = (B/A) \% S$$

donde: % S = Porcentaje de zufre en el carbón.

Este factor (WINEGARTNER, 1974) es una relación empírica que se ha correlacionado con el grado de 'Slagging' o acumulación de escoria parcialmente fundida en los hornos.

Factor de Fouling se calculó Así:

$$\text{Factor de Fouling} = (B/A) \% Na_2O$$

Este factor se usa para juzgar la calidad del carbón en cuanto a la formación de depósitos obstructivos en las tuberías.

8.2.6.2. Cenizas Ligníticas.- Para las cenizas de tipo lignítico se calculó el factor de Slagging según la fórmula:

$$\text{Factor de Slagging} = \text{Max.HT} + 4.\text{Mín DT}$$

Donde: Max HT = Temperatura hemisférica máxima y Min DT = Temperatura mínima de deformación, en el ensayo de fusibilidad en atmósferas reductora y oxidante (COAL PROCESSING CONSULTANTS, 1980).

Para calcular el factor de Fouling en este tipo de cenizas se usó como criterio el contenido de Na_2O directamente.

8.2.7. ANALISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS

Para cada elemento determinado y para los parámetros calculados se efectuó el estudio estadístico (media, mínimo, máximo, desviación estándar e histogramas) Por bloque y para toda la zona.

No se efectuó análisis estadístico por niveles ya que no se observó diferencia entre ellos.

Aunque al observar los histogramas se encuentran casos de distribuciones no simétricas, se usó la media como indicativo de la tendencia central porque la posibilidad de existencia de más de una población en los datos no permite la aplicación de otra estadística sencilla.

Se hizo la correlación lineal de óxidos por pares con el fin de determinar el grado de asociación de los diferentes elementos.

La temperatura de deformación inicial en atmósfera reductora (ITR) se usó como indicativo de la fusibilidad de las muestras y se correlacionó con el porcentaje de óxidos individualmente y con porcentajes de bases, porcentaje de ácidos, relación base-ácido, relación sílica, relación dolomita y relación silicio-aluminio.

8.3. ANALISIS DE RESULTADOS

8.3.1. CLASIFICACION DE CENIZAS

Según el criterio de clasificación de cenizas (ver numeral 8.2.5) las cenizas de los carbones de esta zona son de tipo bitumino-

so, excepto las muestras números 151395, 151354, 151422, 151426, 151432, 151407, 151377, 151360 que se clasifican como de tipo lignítico.

8.3.2. ANALISIS QUIMICO DE LAS CENIZAS

El análisis de 10 elementos en las cenizas (ver Tabla 50) muestra que están compuestas principalmente por silicio, aluminio, hierro y calcio con menores cantidades de magnesio, sodio, potasio y titanio; los primeros constituyen el 95.3 %, y los segundos el 3.2 % en promedio como óxidos para la zona. Debe recordarse que aunque estos elementos se reportan como óxidos en realidad están presentes como silicatos, óxidos, sulfatos y carbonatos.

No se observa en la composición química de las cenizas un patrón que caracterice cada bloque, ni una tendencia constante de variación de uno a otro. Comparando las medias de óxidos (Tabla 51) se observa que estos valores cambian poco de un bloque a otro.

En la Figura 101 se comparan los valores de las medias y se aprecia el aumento del contenido de silicio del Bloque V al II y disminución en el Bloque III, determinando un comportamiento contrario para los demás elementos .

El estudio de los histogramas de elementos como óxidos (Figuras 80 a 100) muestra algunas distribuciones asimétricas que pueden estar determinadas porque el contenido de ciertos elementos es predominantemente bajo acercándose a los límites de detección (P_2O_5 , SO_3 , por ejemplo). En otros casos la distribución asimétrica podría implicar la existencia de dos poblaciones de datos debidas al diferente origen que pueden tener los minerales en el carbón; así, valores bajos corresponderían a elementos que provienen de la materia mineral inherente, que aparece en el carbón desde su formación, mientras que valores altos pueden ser debidos a materia mineral aportada después, desde las áreas cercanas en cantidades variables.

En la Tabla 52 vemos que los rangos de contenido de los diferentes elementos presentan valores típicos para cenizas de carbón (BONE, 1936).

La muestra No. 151410 tiene los contenidos de Fe_2O_3 y CaO más altos, 24.16 y 6.02 % respectivamente, diferenciándose de las demás de la zona, lo cual puede deberse a la presencia de pirita y calcita como relleno de fisuras o en forma de concreciones.

Como se ve en la Tabla 7 en la que se dan los resultados de azufre total en el carbón, las muestras 151409 y 151410 tienen los contenidos más altos de este elemento, sin embargo en la ceniza (Tab. 50) se encontró menos de 0.1% en la primera y 1.88% (valor más alto de la zona) para la segunda, lo que se explica por el contenido de calcio en esta última que puede retener el azufre para formar sulfato durante el quemado, mientras que en la muestra 151409 se volatiliza.

En general en esta zona, los contenidos de elementos que pueden dar lugar a problemas para la utilización del carbón, son bajos; así el Fe_2O_3 (exceptuando la muestra No. 151410) es menor de 14.73%, el SO_3 menor de 1.22% el CaO menor de 5.46% y el Na_2O menor de 1.39 % .

En las muestras clasificadas como de cenizas ligníticas, el contenido alto de calcio (5.46 % en la muestra No. 151377, por ejemplo) puede deberse también a la presencia de rellenos minerales en el manto muestreado explicando así la relación $CaO + MgO$ mayor que Fe_2O_3 , de manera que su condición de ligníticas es debida a una causa localizada y eventual más que a una característica debida a la geoquímica de la zona.

De igual manera, los contenidos de P_2O_5 de las muestras Nos. 151410 y 151377 de 3.26 y 3.27 % respectivamente, se pueden atribuir a rellenos minerales. Excluidas éstas el valor más alto de la zona es de 2.82 %.

Los contenidos de SO_3 y P_2O_5 permiten predecir que el coque obtenido con estos carbones cumplirá los requerimientos

TAB. 50: Resultados del análisis químico de cenizas de la Zona Checua - Lenguazaque,

Muestra No. IGM	Muestra No de campo G BS	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	SO ₃ %
BLOQUE V NIVEL TKg 2											
151394	41.	62.07	29.84	2.57	0.88	0.25	0.42	0.58	1.06	1.50	*
151395	42	63.35	23.80	1.29	4.33	0.30	0.48	1.35	2.82	1.51	0.07
151396	43	65.92	28.90	1.72	0.49	0.16	0.31	0.59	0.47	1.37	0.07
151397	44	66.78	26.82	3.00	0.41	0.39	0.72	0.69	0.16	1.22	*
151398	45	68.92	22.85	2.14	0.81	0.20	0.72	0.92	0.31	1.53	*
151399	46	71.06	25.12	1.00	0.32	0.18	0.27	0.51	0.18	1.66	0.05
151400	47	66.35	28.33	1.14	0.66	0.23	0.52	0.78	0.69	1.79	*
151401	48	62.07	24.74	8.29	0.49	0.33	0.83	0.37	0.59	1.30	*
151402	49	65.92	31.35	0.71	0.14	0.15	0.26	0.12	0.19	1.26	*
151408	55	63.78	29.09	1.57	0.46	0.28	0.71	0.58	0.37	1.52	0.07
151433	80	65.06	23.80	5.43	0.64	0.81	1.71	0.35	0.29	1.29	0.24
151434	81	64.21	28.71	2.29	0.63	0.30	0.47	0.89	0.44	1.63	0.13
151435	82	61.64	29.46	3.57	0.34	0.48	1.16	0.63	0.22	1.27	*
151436	83	70.20	24.74	1.86	0.39	0.31	0.61	0.70	0.29	1.40	
BLOQUE V NIVEL TKg 3											
151409	56	58.65	25.12	11.58	0.25	0.63	1.20	0.24	0.24	1.09	*
151410	57	42.80	20.21	24.16	6.02	0.18	0.27	0.55	3.26	0.98	188
151411	58	60.79	25.12	7.86	0.56	0.30	1.51	0.28	0.72	0.96	0.22
151412	59	59.93	30.60	4.00	0.49	0.23	0.54	0.30	0.51	1.36	0.10
BLOQUE I NIVEL TKg2											
151354	1	66.35	22.66	1.43	2.80	0.28	0.64	0.90	2.02	1.29	*
151355	2	68.06	26.06	2.00	0.59	0.61	1.48	0.34	0.38	1.28	*
151356	3	66.78	26.25	1.86	1.16	0.36	0.31	0.96	0.59	1.67	0.32
151413	60	71.06	21.34	2.29	0.70	0.15	0.46	0.34	0.71	1.49	0.10
151414	61	67.21	25.68	2.00	0.52	0.58	1.02	0.35	0.11	1.20	0.30
151415	62	64.64	28.52	2.14	0.50	0.23	0.38	1.37	0.23	1.56	0.11
151416	63	71.50	21.34	1.29	0.46	0.28	0.56	1.39	0.19	1.51	0.13
151417	64	65.92	24.37	5.29	0.34	0.48	1.41	0.43	0.30	1.17	
151418	65	61.21	24.37	10.29	0.59	0.35	0.84	0.82	0.34	1.18	*
151419	66	63.35	27.76	2.72	0.34	1.01	2.62	0.24	0.29	0.94	*
151420	67	57.79	34.76	1.29	0.50	0.20	0.49	0.98	0.48	1.53	*
151421	68	65.07	27.20	1.14	0.73	0.10	0.72	0.51	1.12	1.44	0.13
151426	73	62.07	29.09	1.57	2.50	0.20	0.34	0.50	1.88	1.41	0.17
151427	74	62.92	31.73	1.14	0.31	0.49	1.84	0.40	0.23	0.91	*
151428	75	67.20	25.69	1.36	0.35	0.48	1.89	0.28	0.57	1.22	*
151429	76	65.06	28.14	2.43	0.29	0.26	0.70	0.50	0.18	1.56	*
151430	77	69.35	24.93	1.14	0.22	0.55	1.99	0.23	0.12	1.26	*
151431	78	62.50	28.09	2.14	0.94	0.53	1.20	0.97	0.08	1.19	0.80
151432	79	73.20	20.40	1.00	0.98	0.31	0.88	0.23	1.38	1.81	0.16
BLOQUE I NIVEL TKg3											
151367	14	55.22	27.95	11.01	0.57	0.43	1.20	0.52	0.53	1.08	0.14
151368	15	60.36	28.33	6.57	0.67	0.41	0.99	0.30	0.28	1.27	*
151369	16	68.06	24.93	2.86	0.96	0.41	0.83	0.39	0.52	1.34	0.25
151370	17	59.50	24.55	12.01	0.22	0.55	1.56	0.21	0.13	1.12	*
151371	18	53.94	27.58	14.73	0.49	0.35	0.95	0.63	0.42	1.19	0.11
151372	19	56.50	27.76	9.30	0.78	0.55	1.54	0.35	0.72	1.00	
151381	28	60.78	30.97	2.29	0.36	0.30	0.85	1.04	0.27	1.20	*
151382	29	62.07	28.33	3.72	0.33	0.46	1.26	0.27	0.38	1.10	0.17
151383	30	55.65	31.54	5.15	1.24	0.46	1.05	0.65	1.05	1.36	0.74
151384	31	71.48	24.17	1.14	0.22	0.28	1.68	0.31	0.21	0.76	*
BLOQUE II NIVEL TKg2											
151373	20	69.35	24.36	1.48	0.36	0.16	0.87	0.42	0.42	1.75	0.17
151374	21	68.49	27.39	0.87	0.25	0.08	0.45	0.53	0.22	1.68	0.12
151375	22	66.35	27.57	1.57	0.53	0.31	0.90	0.28	0.38	1.45	0.13
151376	23	70.20	23.42	1.57	0.39	0.33	0.96	0.27	0.37	1.55	*
151378	25	65.07	28.14	1.00	0.47	0.25	0.76	0.57	0.41	1.53	
151379	26	65.42	25.12	4.72	0.53	0.41	1.56	0.24	0.68	1.34	0.10
151380	27	70.63	23.42	1.30	0.32	0.30	1.13	0.46	0.33	1.43	*

Continúa

Continuación tabla 50.

Muestra No.IGM	Muestra No. de campo GBS	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	SO ₃ %
151385	32	69.35	23.61	2.43	0.50	0.83	1.68	0.77	0.11	1.13	0.30
151386	33	72.34	23.42	1.00	0.57	0.31	0.35	0.43	0.21	1.61	0.20
151387	34	65.92	26.06	1.72	1.19	0.38	1.08	0.39	0.83	1.54	0.10
151388	35	59.93	34.94	1.43	0.53	0.18	0.40	0.90	0.61	1.53	*
151389	36	75.50	27.95	2.29	0.53	0.30	0.65	0.46	0.28	1.50	0.21
151392	39	66.78	25.50	13.86	0.68	0.30	0.94	0.30	0.70	1.45	*
151404	51	65.50	25.69	13.00	0.49	0.49	1.23	0.27	0.51	1.30	0.12
151405	52	62.92	30.79	1.57	0.50	0.25	0.46	0.93	0.27	1.50	0.23
151406	53	64.21	27.76	1.72	0.49	0.50	1.00	0.74	0.38	1.42	0.24
151407	54	65.92	28.90	0.71	0.94	0.18	0.32	0.19	0.77	1.45	0.05
BLOQUE II NIVEL TKg3											
151363	10	63.78	29.46	2.00	0.63	0.33	0.94	0.37	0.71	1.38	0.10
151377	24	59.50	24.18	2.79	5.46	0.28	0.94	0.61	3.27	1.31	0.10
151390	37	59.93	30.60	5.00	0.39	0.41	1.23	0.54	0.54	1.33	*
151391	38	65.50	28.14	1.29	0.63	0.36	0.93	0.39	0.68	1.51	0.16
151393	40	59.07	29.27	5.43	0.95	0.33	0.81	0.70	0.80	1.37	0.10
151403	50	60.36	28.71	3.89	0.98	0.60	1.53	0.49	0.77	1.17	0.34
BLOQUE III NIVEL TKg2											
151362	9	55.22	24.55	9.01	2.94	0.43	0.78	0.21	2.43	1.24	1.22
151366	13	59.50	28.33	4.43	1.93	0.33	0.94	0.46	1.46	1.40	0.10
151423	70	65.92	27.01	1.43	0.31	0.71	1.82	0.31	0.23	1.19	*
151424	71	63.35	28.90	2.03	0.26	0.76	2.16	0.55	0.15	1.18	0.07
151425	72	63.78	27.39	2.43	0.64	0.50	1.12	0.75	0.41	1.29	0.13
BLOQUE III NIVEL TKg3											
151357	4	53.51	26.44	11.01	2.10	0.53	0.91	0.31	1.64	0.99	0.63
151359	6	63.78	24.55	8.01	0.28	0.25	1.61	0.21	0.13	1.06	0.09
151360	7	59.65	33.05	1.14	1.96	0.21	0.58	0.48	1.53	1.57	0.09
151361	8	52.26	25.31	16.01	1.56	0.43	0.53	0.50	1.05	1.18	0.41
151364	11	64.64	26.06	2.57	0.85	0.46	1.17	0.54	0.73	1.33	0.29
151365	12	67.63	24.55	2.72	0.85	0.38	0.59	0.48	0.31	1.57	0.18

* = Menor de 0.01 %

que sobre éstos existen para fines de alto horno y fundición.

Igualmente, estos contenidos unidos a los bajos contenidos de álcalis, hace posible la utilización de las cenizas de los carbones de esta zona en hornos de cemento, ya que para este uso hay especificación sobre dichos elementos (McBRIDE, 1981).

8.3.3. PARAMETROS DE CARACTERIZACION CALCULADOS

Estos valores se encuentran en la Tabla 53. El porcentaje de Bases varía entre 1.38 y 31.18 % en la zona, siendo valores moderadamente bajos que permiten predecir temperaturas de fusión altas, según se ilustra

en la Figura 106, que muestra un diagrama de fases idealizado de dos componentes, en el que se representa la composición en porcentaje de bases, variando de 0 a 100 % y la temperatura de fusión correspondiente (WINEGARTNER, 1976). Vemos en esta figura, que para cada composición hay un rango de temperatura que corresponde a la temperatura a la cual comienza la fusión y aquella a la cual termina.

Las cenizas de esta zona se ubican en la parte sombreadas de la figura, alejadas del punto eutéctico (C), punto de mínima temperatura de fusión que se tiene para 43 % de bases.

En forma recíproca, el porcentaje de ácidos es alto variando entre 63.99 y

TAB. 51: Estadísticas de óxidos y parámetros calculados para cada bloque.

Localización	Bloque V				Bloque I				Bloque II				Bloque III			
	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Est.
%SiO ₂	42.80	71.06	63.31	6.15	53.94	33.47	64.61	6.22	59.07	72.34	65.30	3.77	52.26	63.63	60.51	5.10
%Al ₂ O ₃	20.21	31.35	26.59	3.07	12.09	34.76	26.22	4.17	23.42	34.94	27.14	2.90	24.65	33.65	27.19	2.49
%Fe ₂ O ₃	0.71	24.16	4.68	5.70	5.70	0.71	14.73	3.80	3.81	0.71	5.43	2.29	1.39	1.14	16.01	4.62
%CaO	0.14	6.02	1.02	1.55	0.22	2.80	0.71	0.59	0.25	5.46	0.80	1.04	0.26	2.94	1.21	0.87
%MgO	0.15	0.81	0.32	0.17	0.10	1.01	0.39	1.18	0.08	0.83	0.34	0.16	0.20	0.76	0.43	0.18
%Na ₂ O	0.12	1.35	0.58	0.29	0.21	1.39	0.56	0.34	0.19	0.93	0.49	0.21	0.21	0.75	0.42	0.16
%K ₂ O	0.26	1.71	0.71	0.43	0.21	2.62	1.06	0.58	0.32	1.68	0.92	0.38	0.53	2.16	1.10	0.57
%P ₂ O ₅	0.16	3.26	0.71	0.88	0.08	2.02	0.54	0.49	0.11	3.27	0.62	0.62	0.13	2.43	0.89	0.74
%TiO ₂	0.96	1.79	1.37	0.23	0.76	1.81	1.27	0.23	1.13	1.75	1.45	0.15	0.92	1.57	1.24	0.20
%SO ₃	0.05	1.88	0.31	0.59	0.10	0.80	0.25	0.22	0.05	0.34	0.16	0.08	0.07	1.22	0.33	0.35
%Bases	1.38	31.18	7.30	6.79	2.10	17.15	6.53	3.86	2.18	10.08	4.83	2.11	4.37	19.03	8.86	4.76
%Acidos	68.99	98.53	91.26	7.82	82.71	96.65	92.00	3.93	84.99	97.56	93.90	2.80	78.85	94.27	88.06	6.68
Relación Base/ácido	0.01	0.49	0.09	0.11	0.02	0.21	0.07	0.05	0.02	0.12	0.05	0.02	0.05	0.24	0.10	0.06
Relación Silica	0.59	0.99	0.91	0.09	0.78	0.98	0.93	0.06	0.87	0.98	0.95	0.03	0.74	0.96	0.89	0.07
Relación Dolomita	0.06	0.60	0.20	0.12	0.05	0.53	0.21	0.12	0.11	0.57	0.23	0.11	0.05	0.50	0.21	0.11
Relación SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1.96	3.02	2.40	0.31	1.66	6.90	2.59	0.94	1.72	3.09	2.44	0.37	1.80	2.75	2.25	0.23
Factor de Slagging	0.01	1.16	0.13	0.27	0.01	0.36	0.08	0.10	0.01	0.11	0.04	0.03	0.02	0.37	0.12	0.12
Factor de Fouling	0.00	0.27	0.05	0.06	0.01	0.13	0.04	0.03	0.00	0.07	0.03	0.02	0.02	0.12	0.04	0.03

TAB. 52: Estadísticas generales de óxidos y parámetros calculados.

VARIABLE	ESTADÍSTICA			
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estandar
SiO ₂	42.80	83.47	63.93	5.60
Al ₂ O ₃	12.09	34.94	26.68	3.37
Fe ₂ O ₃	0.71	24.16	3.83	4.07
CaO	0.14	6.02	0.87	1.02
MgO	0.08	1.01	0.37	0.17
K ₂ O	0.21	2.62	0.96	0.51
Na ₂ O	0.12	1.39	0.52	0.28
P ₂ O ₅	0.08	3.27	0.65	0.66
TiO ₂	0.76	1.81	1.34	0.22
SO ₃	0.05	1.88	0.25	0.31
% Bases	1.38	31.18	6.56	4.56
% Acidos	63.99	98.53	91.91	5.21
Relación Bases/ Acidos	0.01	0.49	0.07	0.06
Relación Sílica	0.58	0.98	0.93	0.06
Relación Dolomita	0.05	0.60	0.21	0.11
Relación SiO ₂ / Al ₂ O ₃	1.66	6.90	2.46	0.62
Factor de Slagging	0.01	1.16	0.10	0.17
Factor de Fouling	0.01	0.27	0.04	0.04

TAB. 53: Parámetros calculados con base en la composición química de cenizas.

Muestra No. IGM	Muestra No. de campo	Bases %	Acidos %	Relación Base/Acido (RBA)	Relación Sílica (RS)	Relación Dolomita (RD)	Relación Si/Al (SiAl)	Factor de Slagging	Factor de Fouling
BLOQUE V NIVEL TKg2									
151394	41	4.70	93.41	0.05	0.94	0.24	2.08	0.03	0.03
151395	42	7.75	88.66	0.09	0.91	0.60	2.66	*1308	*
151396	43	3.27	96.19	0.03	0.97	0.20	2.28	0.02	0.02
151397	44	5.21	94.82	0.05	0.95	0.15	2.49	0.03	0.04
151398	45	4.79	93.30	0.05	0.96	0.21	3.02	0.03	0.05
151399	46	2.28	97.84	0.02	0.98	0.22	2.83	0.01	0.01
151400	47	3.33	96.47	0.03	0.97	0.27	2.34	0.02	0.03
151401	48	10.31	88.11	0.12	0.87	0.08	2.51	0.13	0.04
151402	49	1.38	98.53	0.01	0.99	0.21	2.10	0.01	0.00
151408	55	3.60	94.39	0.04	0.97	0.21	2.19	0.02	0.02
151433	80	8.94	90.15	0.10	0.90	0.16	2.73	0.05	0.03
151434	81	4.58	94.55	0.05	0.95	0.20	2.24	0.02	0.04
15425	82	6.18	92.37	0.07	0.93	0.13	2.09	0.04	0.04
15436	83	3.87	96.34	0.04	0.96	0.18	2.84	0.02	0.03

*Cenizas Ligníticas.

Continúa

Continuación Tab. 53.

Muestra No.IGM	Muestra No. de campo GBS	Bases %	Acidos %	Relación Base/Acido (RBA)	Relación Sílica (RS)	Relación Dolomita (RD)	Relación Si/Al (SiAl)	Factor de Slagging	Factor de Fouling
BLOQUE V NIVEL TKg3									
151409	56	13.90	84.86	0.16	0.82	0.06	2.33	0.38	0.04
151410	57	31.18	63.99	0.49	0.59	0.20	2.12	1.16	0.27
151411	58	10.51	86.87	0.12	0.87	0.08	2.42	0.20	0.03
151412	59	5.56	91.89	0.06	0.93	0.13	1.96	0.07	0.02
BLOQUE I NIVEL TKg2									
151354		6.05	87.30	0.07	0.93	0.51	2.80	*13.78	*
151355	2	5.02	95.40	0.05	0.96	0.24	2.61	0.03	0.02
151356	3	4.65	94.70	0.05	0.95	0.33	2.54	0.02	0.05
151413	60	3.94	93.89	0.04	0.96	0.22	3.33	0.02	0.01
151414	61	4.47	94.09	0.05	0.96	0.25	2.62	0.02	0.02
151415	62	4.62	94.72	0.05	0.96	0.16	2.27	0.03	0.07
151416	63	3.98	94.35	0.04	0.97	0.19	3.35	0.02	0.06
151417	64	7.95	91.46	0.09	0.92	0.10	2.70	0.06	0.04
151418	65	12.89	86.76	0.15	0.84	0.07	2.51	0.16	0.12
151419	66	6.93	92.05	0.08	0.94	0.19	2.28	0.60	0.02
151420	67	3.46	94.08	0.04	0.97	0.20	1.66	0.02	0.04
151421	68	3.20	93.71	0.03	0.97	0.26	2.39	0.02	0.02
151422	69	2.10	96.65	0.02	0.98	0.40	6.90	*1408	*
151426	73	5.11	92.57	0.06	0.94	0.53	2.13	*1476	*
151427	74	4.18	95.56	0.04	0.97	0.19	1.98	0.03	0.02
151428	75	4.36	94.11	0.05	0.97	0.19	2.62	0.03	0.01
151429	76	4.18	94.76	0.04	0.96	0.13	2.31	0.03	0.02
151430	77	4.13	95.54	0.04	0.97	0.19	2.78	0.02	0.01
151431	78	5.78	91.78	0.06	0.95	0.25	2.22	0.05	0.06
151432	79	3.40	95.41	0.04	0.97	0.38	3.59	*1484	*
BLOQUE I NIVEL TKg3									
151367	14	13.73	84.25	0.16	0.82	0.07	1.98	0.27	0.08
151368	15	8.94	89.96	0.10	0.89	0.12	2.13	0.15	0.03
151369	16	5.45	94.33	0.06	0.94	0.25	2.73	0.04	0.02
151370	17	14.55	85.17	0.17	0.82	0.05	2.42	0.36	0.04
151371	18	17.15	82.71	0.21	0.78	0.05	1.96	0.35	0.13
151372	19	12.52	85.26	0.15	0.84	0.11	2.04	0.31	0.08
151381	28	4.84	92.95	0.05	0.95	0.14	1.96	0.04	0.05
151382	29	6.04	91.50	0.07	0.93	0.13	2.19	0.08	0.02
151383	30	8.55	88.55	0.10	0.89	0.20	1.76	0.09	0.06
151384	31	3.63	96.41	0.04	0.98	0.14	2.96	0.03	0.01

* Cenizas Ligníticas

Continúa

Continuación Tab. 53.

Muestra No.IGM	Muestra No. de campo GBS	Bases %	Acidos %	Relación Base/Acido (RBA)	Relación Sílica (RS)	Relación Dolomita (RD)	Relación Si/Al (SiAl)	Factor de Slagging	Factor de Fouling
BLOQUE II NIVEL TKg2									
151373	20	3.29	95.46	0.03	0.97	0.16	2.85	0.02	0.01
151374	21	2.18	97.56	0.02	0.98	0.15	2.50	0.01	0.01
151375	22	3.59	95.37	0.04	0.96	0.23	2.41	0.02	0.01
151376	23	3.52	95.17	0.04	0.97	0.20	3.00	0.02	0.01
151378	25	3.05	94.74	0.03	0.97	0.24	2.31	0.02	0.02
151379	26	7.46	91.88	0.08	0.92	0.13	2.60	0.10	0.02
151380	27	3.51	95.48	0.04	0.97	0.18	3.02	0.02	0.02
151385	32	6.21	94.09	0.07	0.95	0.21	2.94	0.03	0.05
151386	33	2.66	97.37	0.03	0.97	0.33	3.09	0.01	0.01
151387	34	4.76	93.52	0.05	0.95	0.33	2.53	0.03	0.02
151388	35	3.44	96.40	0.04	0.97	0.21	1.72	0.02	0.03
151389	36	4.23	94.95	0.04	0.95	0.20	2.34	0.02	0.02
151392	39	6.08	93.73	0.06	0.93	0.16	2.62	0.07	0.02
151404	51	5.48	92.49	0.06	0.94	0.18	2.55	0.04	0.02
151405	52	3.71	95.21	0.04	0.96	0.20	2.04	0.02	0.04
151406	53	4.45	93.39	0.05	0.96	0.22	2.31	0.03	0.04
151407	54	2.34	96.27	0.02	0.97	0.48	2.28	* 1540	
BLOQUE II NIVEL TKg 3									
151363	10	4.27	94.62	0.05	0.96	0.22	2.16	0.04	0.02
151377	24	10.03	84.99	0.12	0.87	0.57	2.46	* 1328	*
151390	37	7.57	91.86	0.08	0.91	0.11	1.96	0.07	0.04
151391	38	3.60	95.15	0.04	0.97	0.28	2.33	0.02	0.01
151393	40	8.22	89.71	0.09	0.90	0.16	2.02	0.11	0.06
151403	50	7.49	90.24	0.08	0.92	0.21	2.10	0.08	0.04
BLOQUE III NIVEL TKg2									
151362	9	13.37	81.01	0.17	0.82	0.25	2.25	0.22	0.03
151366	13	8.09	89.23	0.09	0.90	0.28	2.10	0.10	0.04
151423	70	4.58	94.12	0.05	0.96	0.22	2.44	0.02	0.02
151424	71	5.76	93.43	0.06	0.95	0.18	2.19	0.03	0.03
151425	72	5.44	92.46	0.06	0.95	0.21	2.33	0.03	0.04
BLOQUE III NIVEL TKg3									
151357	4	14.86	80.94	0.18	0.80	0.18	2.02	0.37	0.06
151358	5	9.82	86.94	0.11	0.83	0.10	1.96	0.20	0.03
151359	6	10.36	89.39	0.12	0.88	0.05	2.60	0.16	0.02
151360	7	4.37	94.27	0.05	0.95	0.50	1.80	* 1540	*
151361	8	19.03	78.75	0.24	0.74	0.10	2.06	0.28	0.12
151364	11	5.59	92.03	0.06	0.94	0.23	2.48	0.03	0.03
151365	12	5.02	93.75	0.05	0.94	0.25	2.75	0.03	0.03

* CENIZAS LIGNITICAS

98.53 %. Este carácter ácido de las cenizas que se reflejará en las cenizas del coque obtenido con estos carbones, implicará mayores requerimientos de caliza para neutralizar y fluidizar la escoria en el alto horno, si se tienen en cuenta las consideraciones que al respecto hace Lowry (LOWRY, 1963).

La relación Base/Acido al igual que los dos parámetros anteriores puede usarse para predecir el comportamiento de las cenizas

en cuanto a fusibilidad. En este caso varía entre 0.01 y 0.49, con mayor frecuencia entre 0.01 y 0.06, valores que son bastante bajos y confirman las consideraciones anteriores.

Los valores de relación sílica y relación dolomita se dan con propósito informativo ya que son valores que se usan para predecir propiedades de viscosidad de la escoria, característica ésta que es difícil determinar experimentalmente.

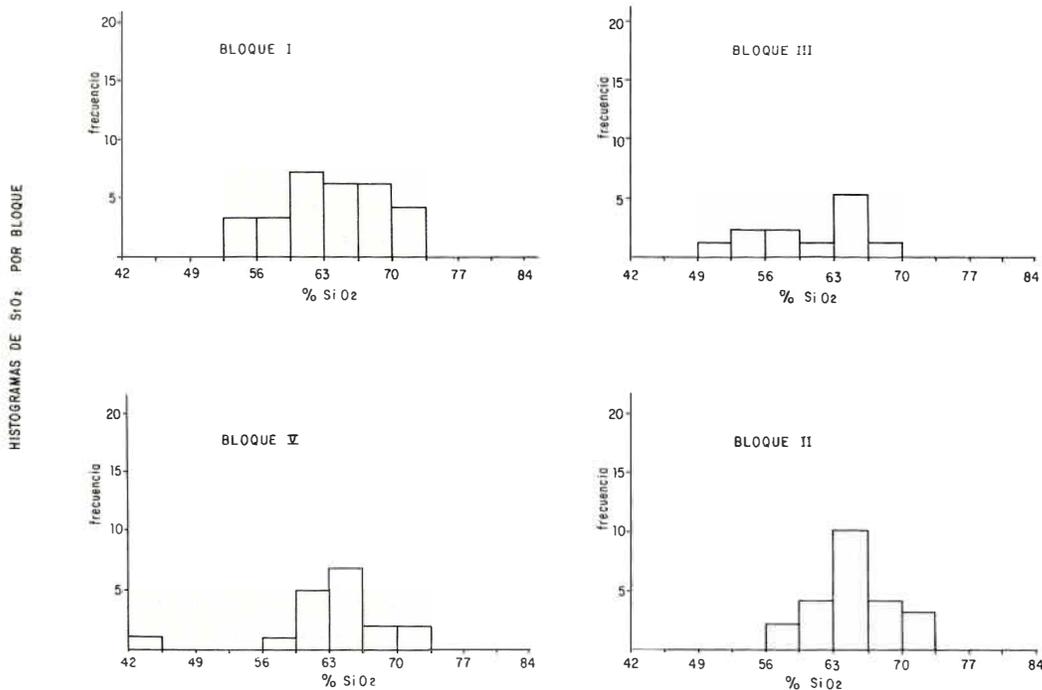


FIG. 80: Histogramas de SiO_2 por bloque.

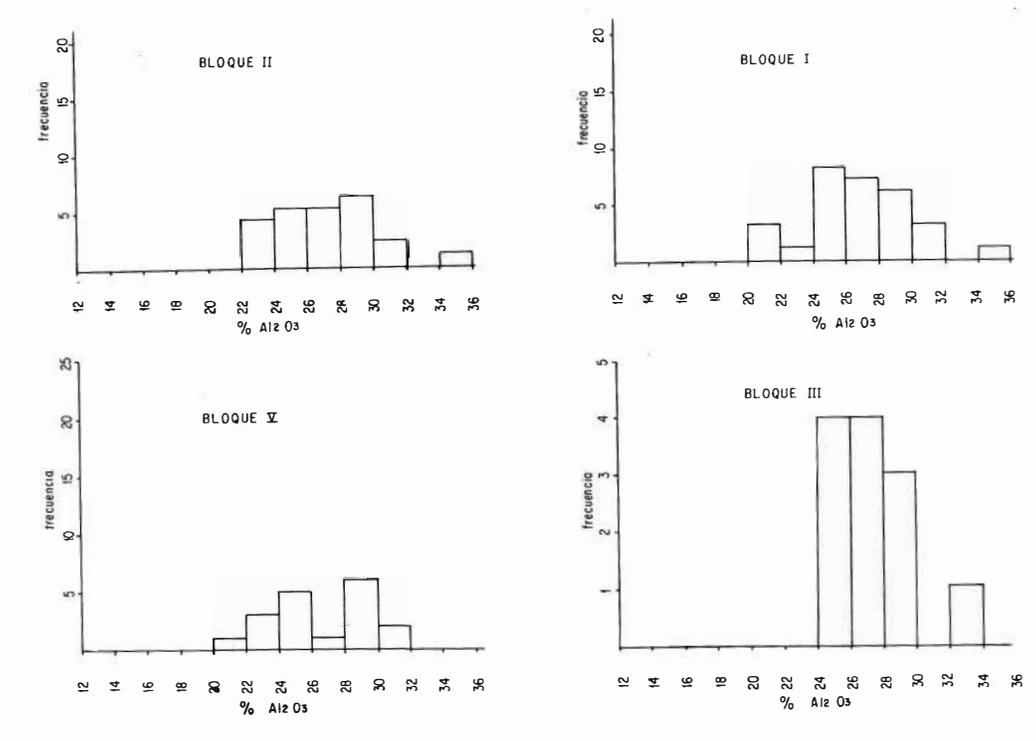


FIG. 81: Histogramas de Al₂O₃ por bloque.

La relación SiO₃ / Al₂O₃ varía entre 1.66 y 6.90 con media de 2.46; su utilidad está también en la predicción de viscosidad de la escoria, principalmente en muestras que como éstas, tienen bajo porcentaje de Bases. Se usa específicamente para determinar T250 (temperatura a la cual la viscosidad de la escoria será 250 poises). Esto puede hacerse interpolando en una gráfica de T250 vs % de bases (Figura 107); teniendo

una familia de curvas según el valor de relación SiO₂ / Al₂O₃, se requiere mayor temperatura para tener la misma viscosidad. Para muestras con % de bases mayor de 40 se usaría la relación dolomita.

Por otra parte, los valores de SiO₂ / Al₂O₃ son mayores que el valor típico para minerales arcillosos, lo cual indica que estos dos elementos no están relacionados única-

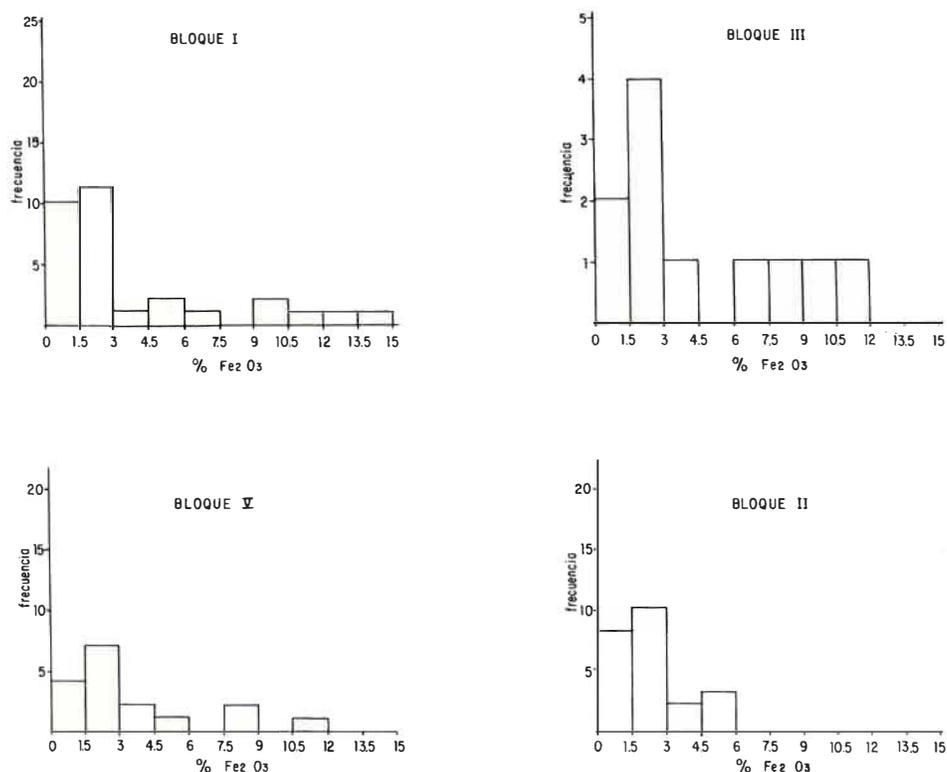


FIG. 82: Histogramas de Fe₂O₃ por bloque.

mente a través de la presencia de estos minerales, sino que existe SiO₂ libre como cuarzo. Este último puede causar problemas de abrasión tanto en el pretratamiento del carbón como en calderas por salir con las cenizas volantes (VOINA, 1978).

En cuanto al factor de Slagging (deposición), considerando la clasificación de grado de Slagging para cenizas bituminosas,

según la cual un factor menor de 0.6 es bajo, de 0.6 a 2.0 medio, de 2.0 a 2.6 alto y mayor de 2.6 severo; vemos que todas las muestras de este tipo de cenizas tienen factor Slagging bajo, excepto la muestra Número 151410 que se clasifica como medio.

Para las cenizas ligníticas se tiene que, un factor mayor de 1340 corresponde a un grado de Slagging bajo, de 1340 a 1230

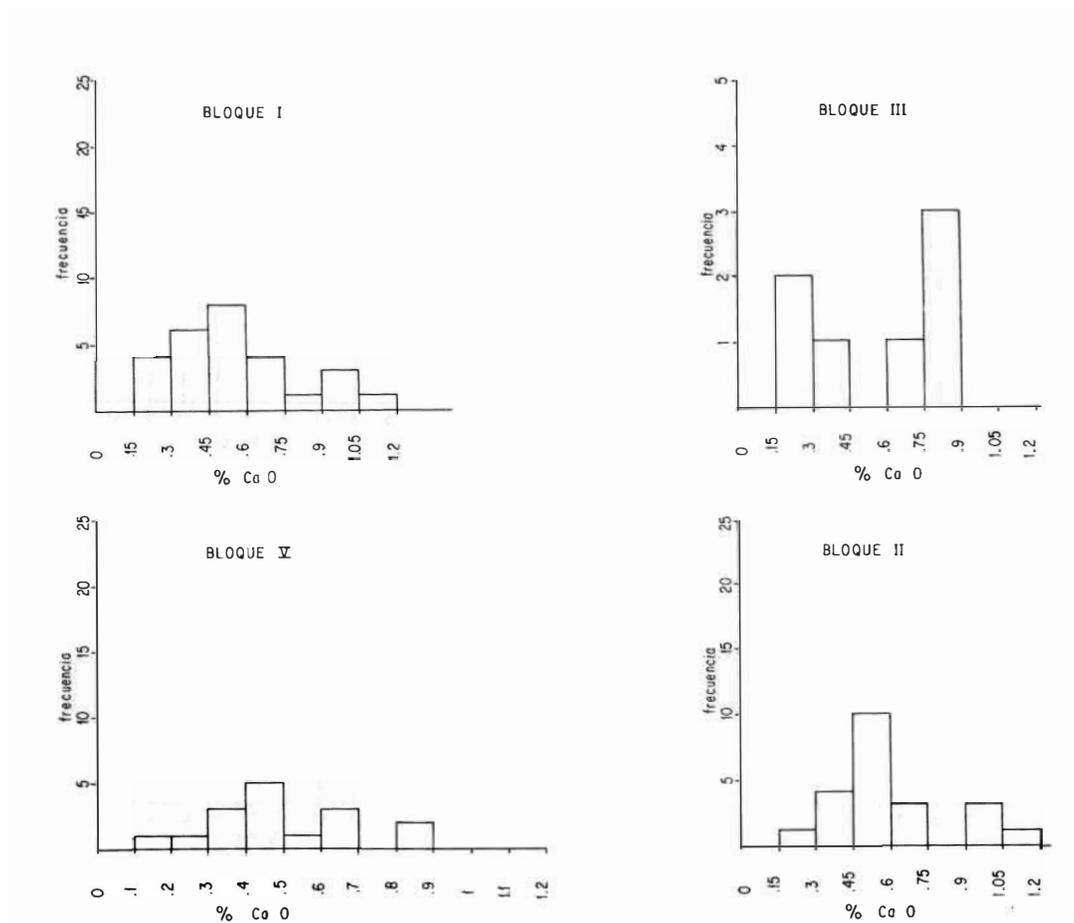


FIG. 83: Histogramas de CaO por bloque.

medio, de 1230 a 1150 alto y menor de 1150 severo; de esta forma las muestras de cenizas ligníticas Nos. 151392 y 151377 tienen factor de Slagging medio y las demás bajo.

Por lo anterior puede decirse que las cenizas de carbones de esta zona no presentarán problemas de escorificación, cuando se sometán a procesos de quemado.

Para el factor de Fouling (enconstramiento), con base en la clasificación de factor para cenizas bituminosas, según la cual un factor menor de 0.2 es bajo, de 0.2 a 0.5 medio, de 0.5 a 1.0 alto y mayor, de 1.0 severo, se tiene que todas las muestras con cenizas bituminosas tienen factor de Fouling bajo, excepto la No. 151410, cuyo factor se clasifica como medio.

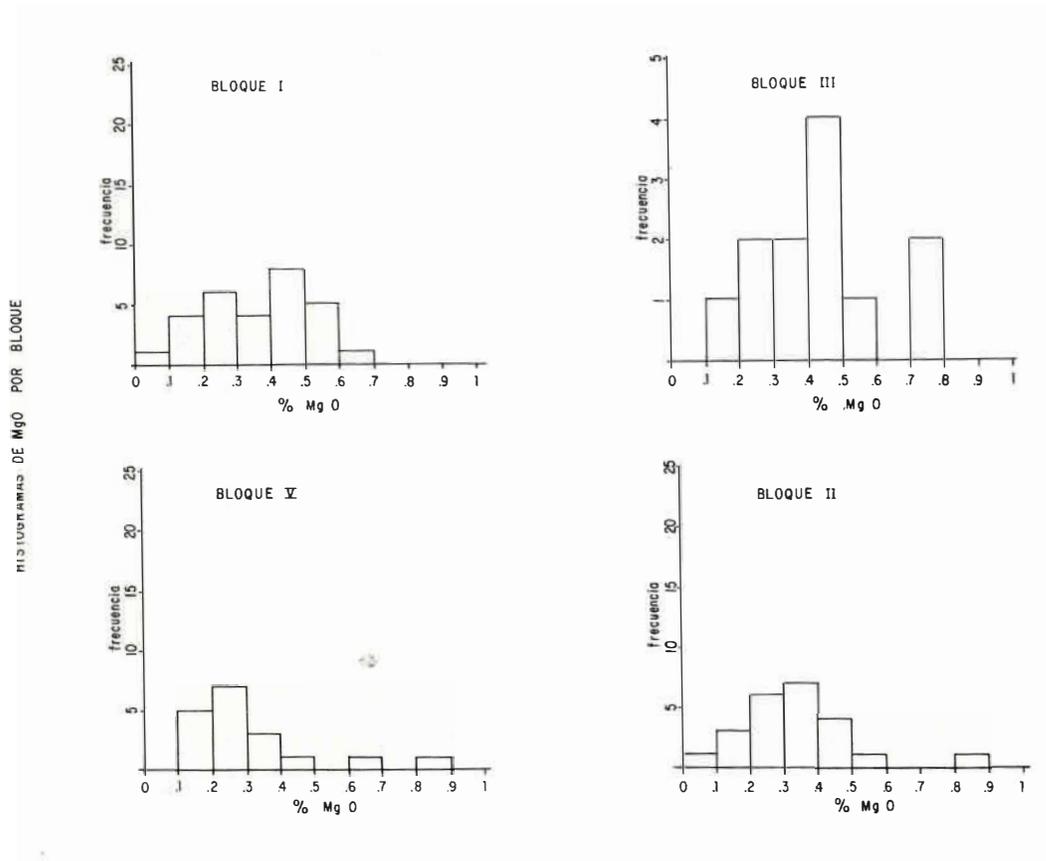


FIG. 84: Histogramas de MgO por bloque.

Para las cenizas ligníticas con base en el contenido de Na_2O , se considera que menos de 2.0 %es bajo, de manera que todas las muestras de este tipo tienen factor de Fouling bajo.

Puede decirse que las cenizas de carbones de la zona no presentarán problemas de formación de depósitos obstructivos.

8.3.4. CORRELACION ENTRE OXIDOS

En la tabla 54 se encuentran los coeficientes de correlación lineales entre óxidos por pares, los cuales miden las asociaciones de los diferentes elementos que son consecuencia de la mineralogía de la zona.

En la segunda parte de la tabla se correlacionan en total solo 71 de las 83 mues-

TAB. 54: Coeficientes de correlación lineal entre pares de óxidos

BLO- QUE	PAR DE OXIDOS CORRELACIONADOS													No de Pares
	SiO ₂ Al ₂ O ₃	SiO ₂ Fe ₂ O ₃	SiO ₂ CaO	SiO ₂ MgO	SiO ₂ Na ₂ O	SiO ₂ K ₂ O	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ CaO	Al ₂ O ₃ MgO	Al ₂ O ₃ Na ₂ O	Al ₂ O ₃ K ₂ O	Fe ₂ O ₃ CaO	Fe ₂ O ₃ MgO	
V	0.308	-0.900*	-0.696*	-0.017	0.195	-0.011	-0.592*	-0.583*	-0.199	-0.227	-0.219	0.623*	0.134	18
I	-0.804*	-0.650*	-0.008	-0.264	-0.141	-0.180	0.124	-0.067	0.220	0.202	0.195	0.165	0.198	30
II	-0.699*	-0.537*	-0.405	-0.038	0.416	-0.057	-0.068	-0.179	0.241	0.445*	-0.363	0.128	0.393	23
III	-0.042	-0.804*	-0.713*	0.227	0.302	0.329	-0.470	0.034	0.166	0.262	0.138	0.422	0.169	12
General	-0.447*	-0.743*	-0.436*	-0.121	-0.030	-0.068	-0.161	-0.213	-0.006	0.136	0.013	0.344*	0.139	83

BLO- QUE	PAR DE OXIDOS CORRELACIONADOS													No. de Pares
	Fe ₂ O ₃ Na ₂ O	Fe ₂ O ₃ K ₂ O	CaO MgO	CaO Na ₂ O	CaO K ₂ O	MgO Na ₂ O	MgO K ₂ O	Na ₂ O K ₂ O	SO ₃ SiO ₂	SO ₃ Al ₂ O ₃	SO ₃ Fe ₂ O ₃	SO ₃ CaO	SO ₃ MgO	
V	-0.283	0.136	-0.190	0.406	-0.283	-0.195	0.822*	-0.299	0.925*	-0.670*	0.977*	0.778*	-0.149	15
I	-0.105	0.132	-0.269	0.189	-0.436*	-0.363	0.825*	-0.536*	-0.323	0.419	-0.067	0.229	0.605*	26
II	-0.000	0.555*	-0.043	0.094	0.024	0.103	0.802*	-0.149	0.064	-0.033	0.038	-0.227	0.610*	19
III	-0.363	-0.313	-0.287	-0.247	-0.686*	0.251	0.357	-0.187	-0.620*	-0.796	0.526	0.703*	0.054	11
General	-0.164	0.079	-0.156	0.170	-0.261*	-0.189	0.750*	-0.387*	-0.633*	-0.275*	0.650*	0.815*	0.101	71

* Coeficiente significativo al nivel de 5% de acuerdo al número de pares de datos.

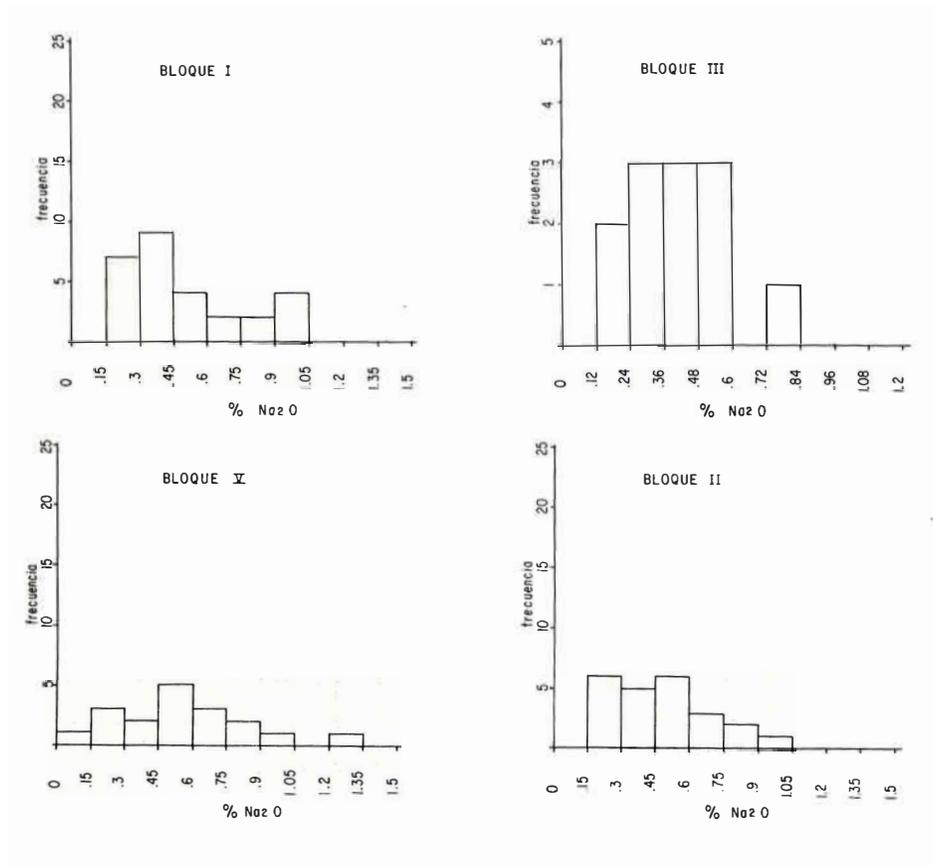


FIG. 85: Histogramas de Na₂O por bloque.

tras, debido a que donde se incluye %SO₃ ó ITR hay casos en que los resultados están por fuera de los límites de detección.

En general los coeficientes no son muy altos, lo cual indica que hay minerales

aportados al carbón en forma variable dependiendo de su localización.

El silicio presenta correlación negativa significativa con el aluminio, hierro y calcio, confirmando que su aporte principal no

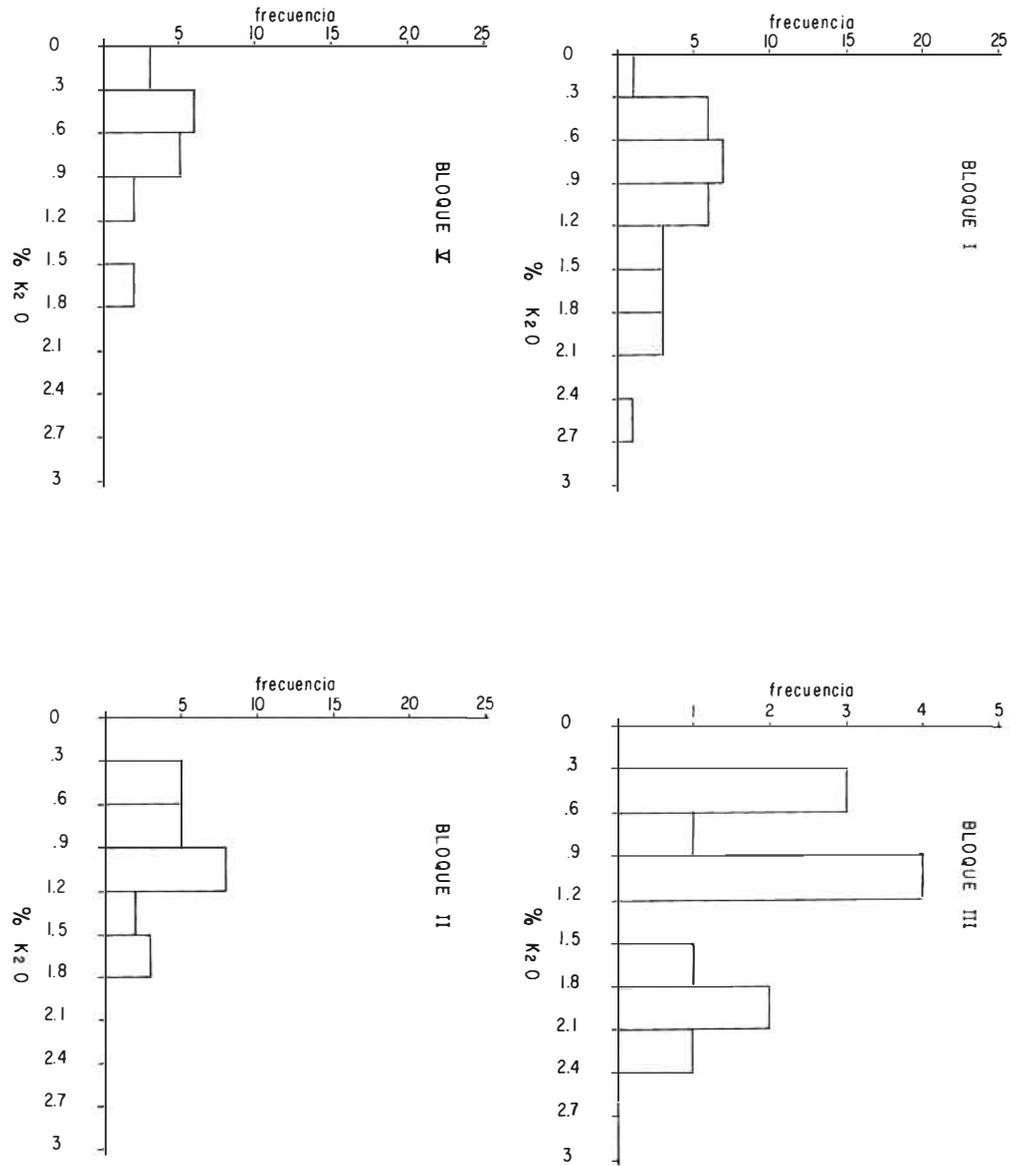


FIG. 86: Histogramas de K₂O por bloque.

es debido a arcillas, en las cuales estaría asociado con dichos elementos, sino a la presencia de cuarzo. Además al representar el SiO₂ hasta un 83.47 % de la ceniza, al aumentar su contenido disminuye el de otros elementos.

El aluminio no tiene correlación positiva con otros elementos; su aporte puede ser debido a arcillas (al parecer el contenido de éstas no es muy alto comparado con el de otros minerales), o bien a la presencia de Al₂O₃ libre (Diaspora).

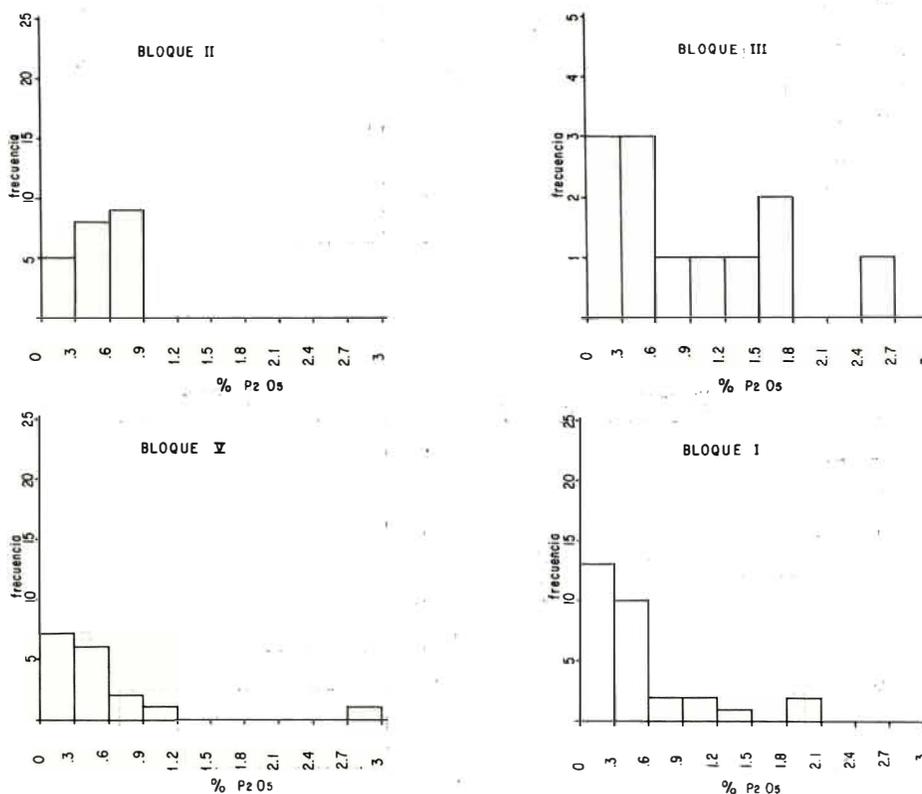


FIG. 87: Histogramas de P₂O₅ por bloque.

El hierro tiene correlación positiva con el calcio en los bloques V y III y en general para la zona, indicando su presencia conjunta posiblemente en carbonatos como la Ankerita, ya que este mineral está presente con frecuencia a lo largo de las fisuras o uniones en depósitos de carbón.

Así mismo, el hierro correlaciona positivamente con el azufre, en particular en los bloques V y III; se esperaba la asociación

de estos dos elementos ya que suelen encontrarse en la pirita, mineral de común ocurrencia en el carbón; sin embargo el grado de correlación se ve afectado debido a que el azufre puede volatilizarse al quemar la muestra; a pesar de ello, en la Figura 101 se observa tendencia similar en la variación de las medias por bloque para el Fe₂O₃ y SO₃.

Otra correlación positiva significativa es la que se presenta entre el magnesio y el

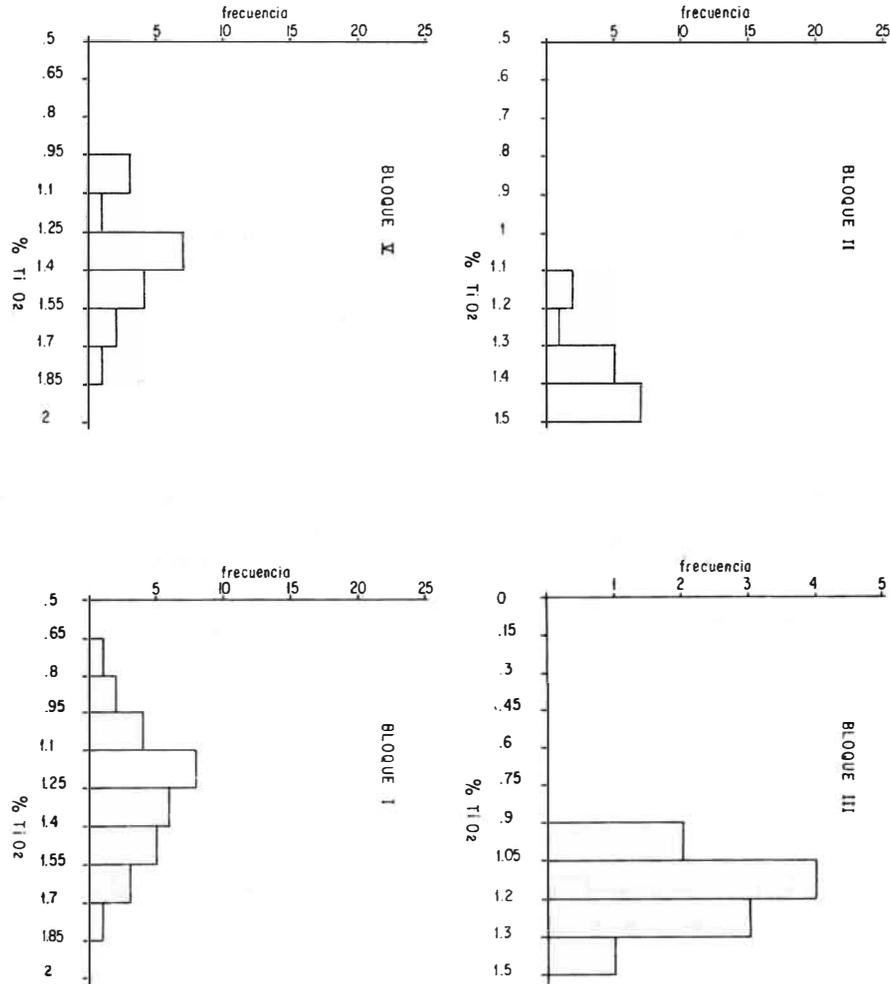


FIG. 88: Histogramas de TiO_2 por bloque.

potasio en toda la zona y que puede explicarse por la presencia de un mineral que los asocie a los dos como la biotita.

La correlación de azufre con calcio y magnesio se explica por la retención que estos últimos hacen del primero para formar sulfatos durante el quemado.

En la Figura 101 se observa un com-

portamiento similar de las medias de % de P_2O_5 y % de CaO en su variación de un bloque a otro; probablemente estos elementos están presentes en la Apatita, mineral que también suele encontrarse en carbones.

8.3.5. FUSIBILIDAD

En la Tabla 55 se encuentran los resultados del ensayo de fusibilidad y en la Fi-

TAB. 55: Resultado del análisis de Fusibilidad de las cenizas de los Carbones de la Zona Checua - Lenguaque.

Muestra No.IGM	Muestra No.camp. GBS	Ensayo en Atmósfera Reductora				Ensayo en Atmósfera Oxidante			
		Deform. Inic.:ID	Abland. H=W	Hemiesf. H=W/2	Fluidez F	Deform. Inic.:ID	Abland. H=W	Hemiesf. H=W/2	Fluidez F
BLOQUE V NIVEL TKg2									
151394	41	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151395	42	1280	1375	1410	1500	1290	1380	1420	1510
151396	43	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151397	44	1510	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151398	45	1490	-1540	-	-	1530	-1540	-	-
151399	46	1500	-1540	-	-	1510	-1540	-	-
151400	47	1530	-1540	-	-	1540	-	-	-
151401	48	1320	1460	1500	1400	1490	1540	-	-
151402	49	1510	-1540	-	-	1530	-1540	-	-
151408	55	1360	-1540	-	-	1370	-1540	-	-
151433	80	1450	1490	1515	1520	1455	1495	1510	1525
151434	81	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151435	82	1430	-1540	-	-	1460	-1540	-	-
151436	83	1390	-1540	-	-	1410	-1540	-	-
BLOQUE V NIVEL TKg 3									
151409	56	1105	1170	1230	1280	1320	1350	1380	1400
151410	57	1100	1310	1340	1345	1260	1290	1320	1350
151411	58	1390	1520	1530	-1540	1480	1515	1525	-1540
151412	59	1425	-1540	-	-	1470	-1540	-	-
BLOQUE I NIVEL TKg2									
151354	1	1345	1400	1470	1500	1350	1450	1510	1540
151355	2	1470	-1540	-	-	1530	-1540	-	-
151356	3	1460	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151413	60	1430	1480	1500	1515	1440	1470	1515	1530
151414	61	1500	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151415	62	1540	-1540	-	-	-1540	-	-	-
151416	63	1420	-1540	-	-	1500	-1540	-	-
151417	64	1460	1535	-1540	-	1470	1520	1540	-1540
151418	65	1440	-1540	-	-	1450	1480	1520	1535
151419	66	1490	1530	-1540	-	1500	1535	-1540	-
151420	67	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151421	68	1410	-1540	-	-	1445	-1540	-	-
151422	69	1375	1500	-1540	-	1400	1510	-1540	-
151426	73	1460	-1540	-	-	1480	-1540	-	-
151427	74	1420	-1540	-	-	1460	-1540	-	-
151428	75	1510	-1540	-	-	1515	-1540	-	-
151429	76	1515	-1540	-	-	1525	-1540	-	-
151430	77	1480	-1540	-	-	1490	-1540	-	-
151431	78	1520	-1540	-	-	1525	-1540	-	-
151432	79	1470	1515	-1540	-	1480	1520	-1540	-
BLOQUE I NIVEL TKg3									
151367	14	1390	1460	1500	1540	1450	1510	1540	-1540
151368	15	1500	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151369	16	1450	-1540	-	-	1510	-1540	-	-
151370	17	1320	1380	1440	1490	1440	1480	1510	1540

continúa

Continuación Tabla 55.

Muestra No.IGM	Muestra No.camp. GBS	Ensayo en Atmósfera Reductora Temperatura en °C Deform. Inic.:ID	Ensayo en Atmósfera Reductora Temperatura en °C			Ensayo en Atmósfera Oxidante Temperatura en °C			
			Abland. H=W	Hemiesf. H=W/2	Fluidez F	Deform. Inic.:ID	Abland. H=W	Hemiesf. H=W/2	Fluidez F
151371	18	1310	1370	1430	1480	1440	1490	1510	1540
151372	19	1300	1450	1480	1500	1450	1500	1520	1540
151381	28	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151382	29	1520	-1540	-	-	-1540	-	-	-
151383	30	1500	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151384	31	1520	-1540	-	-	-1540	-	-	-
BLOQUE II NIVEL TKg2									
151373	20	1480	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151374	21	1500	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151375	22	1490	-1540	-	-	1530	-1540	-	-
151376	23	1480	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151378	25	1470	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151379	26	1450	1530	-1540	-	1490	-1540	-	-
151380	27	1490	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151385	32	1380	1520	-1540	-	1460	-1540	-	-
151386	33	1430	-1540	-	-	1480	-1540	-	-
151387	34	1500	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151388	35	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151389	36	1540	-1540	-	-	-1540	-	-	-
151392	39	1450	-1540	-	-	1465	-1540	-	-
151404	51	1500	-1540	-	-	1500	-1540	-	-
151405	52	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151406	53	1390	-1540	-	-	1410	-1540	-	-
151407	54	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
BLOQUE II NIVEL TKg3									
151363	10	1520	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151377	24	1220	1310	1370	1420	1270	1350	1400	1460
151390	37	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151391	38	1480	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151393	40	1480	-1540	-	-	1510	-1540	-	-
151403	50	1420	-1540	-	-	1440	-1540	-	-
BLOQUE III NIVEL TKg2									
151362	9	1240	1300	1360	1430	1360	1410	1450	1480
151366	13	1480	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151423	70	1490	-1540	-	-	1520	-1540	-	-
151424	71	1525	-1540	-	-	-1540	-	-	-
151425	72	1450	-1540	-	-	1470	-1540	-	-
BLOQUE III NIVEL TKg3									
151357	4	1210	1400	1450	1490	1440	1490	1510	-1540
151358	5	1480	-1540	-	-	1540	-1540	-	-
151359	6	1400	1480	1520	-1540	1500	-1540	-	-
151360	7	-1540	-	-	-	-1540	-	-	-
151361	8	1190	1290	1340	1410	1380	1420	1450	1470
151364	11	1440	-1540	-	-	1480	-1540	-	-
151365	12	1440	-1540	-	-	1480	-1540	-	-

: Mayor de 1540° C.

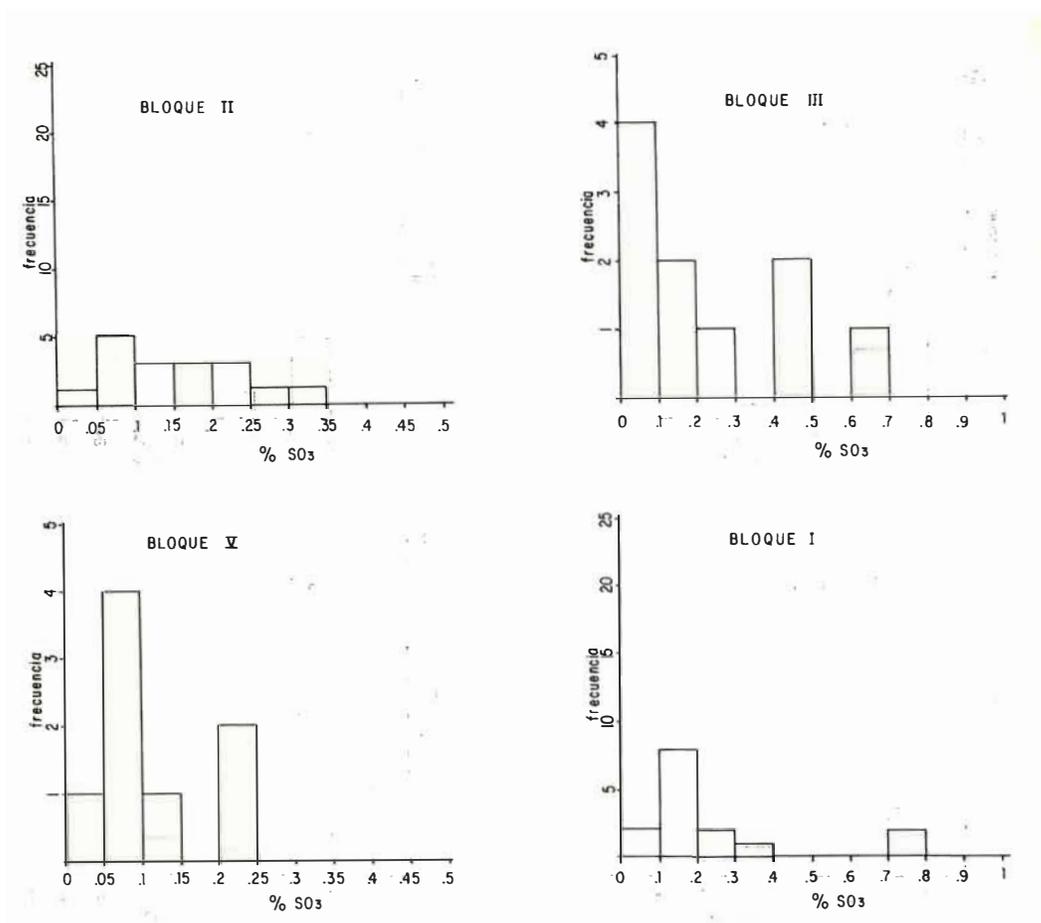


FIG. 89: Histogramas de SO₃ por bloque.

gura 104 se muestran los histogramas de la temperatura inicial de deformación en atmósfera reductora que dan un indicativo de la mínima temperatura a la cual empiezan a fundirse las muestras, ya que esta temperatura en atmósfera oxidante es siempre mayor. En la figura se aprecia que estas temperaturas son altas, con mayor frecuencia con valores entre 1450 y 1500°C; además examinando la tabla se observa que en atmósfera reductora las temperaturas de ablandamiento y fluidez son mayores de 1540°C para el 72 y 82 % de las muestras respectiva-

mente, y que en atmósfera oxidante estos porcentajes son algo mayores.

Debido a sus altas temperaturas de fusión estas muestras no presentarán problemas de acumulación de escoria parcialmente fundida en los procesos de utilización del carbón.

Al respecto, algunos autores dan como mínimo de seguridad una temperatura de 1300°C (FRANCIS, 1969), pero esto depende lógicamente del uso específico que se va a

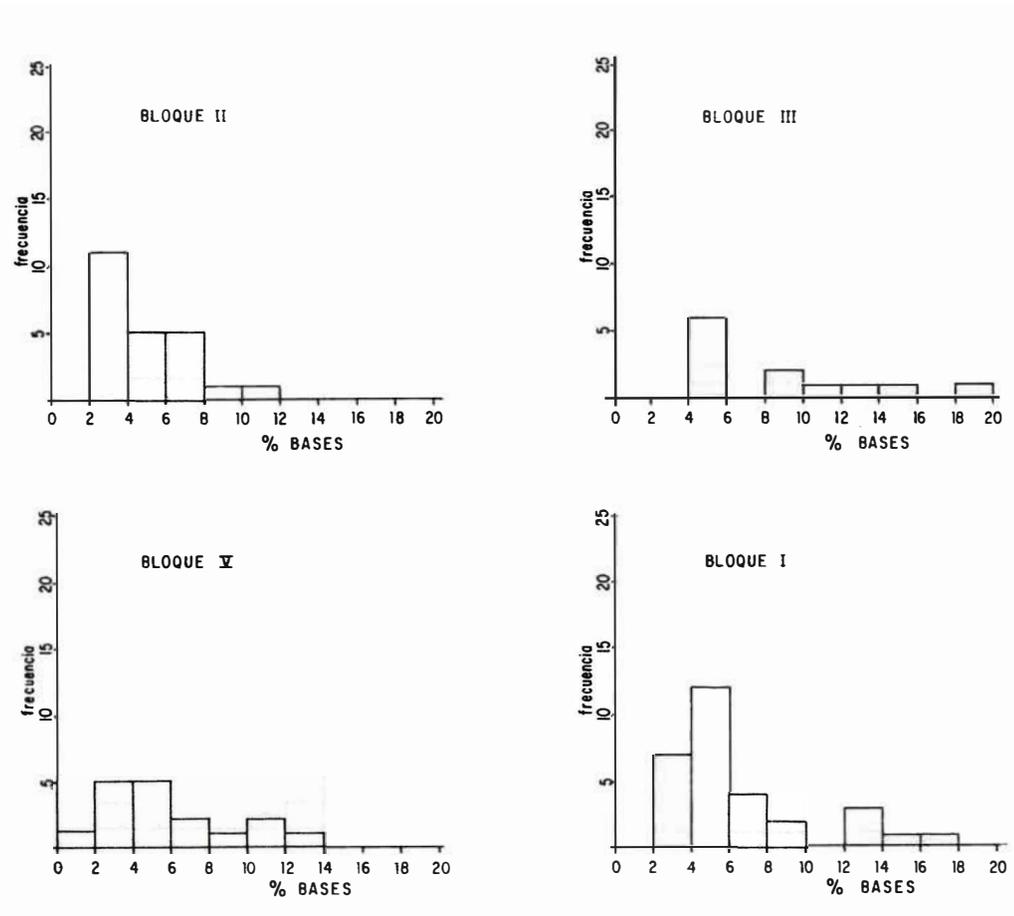


FIG. 90: Histogramas de % de bases por bloque.

dar al carbón y de los equipos que se empleen.

McBride anota que para calderas que aceptan una amplia gama de calidades de carbón, se tiene un nivel de diseño de 1200°C, con un mínimo de 1050°C.

8.3.6. CORRELACIONES ENTRE FUSIBILIDAD Y COMPOSICION DE LAS MUESTRAS

Con el fin de correlacionar las propiedades de fusibilidad con la composición química de las muestras, se usó la temperatura de deformación inicial en atmósfera re-

ductora (que llamaremos ITR) puesto que para muchas de las muestras la segunda temperatura (de ablandamiento) es mayor de 1540°C, que es la máxima determinable.

En la Tabla 56 se muestran los coeficientes de correlación entre algunos elementos expresados como óxidos e ITR. El silicio y el aluminio presentan correlación positiva significativa para la zona, especialmente el primero, lo cual se explica por el carácter refractario de estos dos elementos; por el contrario, el hierro y el calcio presentan correlación negativa demostrando que estos elementos actúan como fundentes.

TAB. 56: Coeficiente de correlación lineal entre ITR (1) como indicativo de fusibilidad y algunos óxidos y parámetros calculados con base en composición química de las cenizas.

BLOQUE	PAR DE VARIABLES CORRELACIONADAS												No. DE PARES
	ITR SiO ₂	ITR Al ₂ O ₃	ITR Fe ₂ O ₃	ITR CaO	ITR MgO	ITR SO ₃	ITR Bases	ITR Acidos	ITR RBA	ITR RS	ITR RD	ITR SiAl	
V	0.625*	0.449	-0.570*	-0.653*	-0.088	-0.555*	-0.639*	0.675*	-0.623*	0.646*	-0.231	0.148	15
I	0.351	0.065	-0.595*	-0.262	0.105	0.536*	-0.622*	0.697*	-0.625*	0.644*	-0.058	0.093	26
II	0.321	0.343	-0.164	-0.799*	-0.279	-0.193	-0.625*	0.675*	0.679*	0.610*	0.697*	0.071	19
III	0.770*	0.583	-0.886*	-0.707*	0.120	0.688*	-0.896*	0.908*	-0.910*	0.911*	0.195	0.301	11
General	0.598*	0.227*	0.738*	-0.441*	-0.092	-0.481*	-0.724*	0.724*	-0.695*	0.738*	0.275*	0.217	71

(1) Temperatura de deformación inicial en atmósfera reductora.

* Coeficiente significativo al nivel de 5 % de acuerdo al número de pares de datos (ver apéndice).

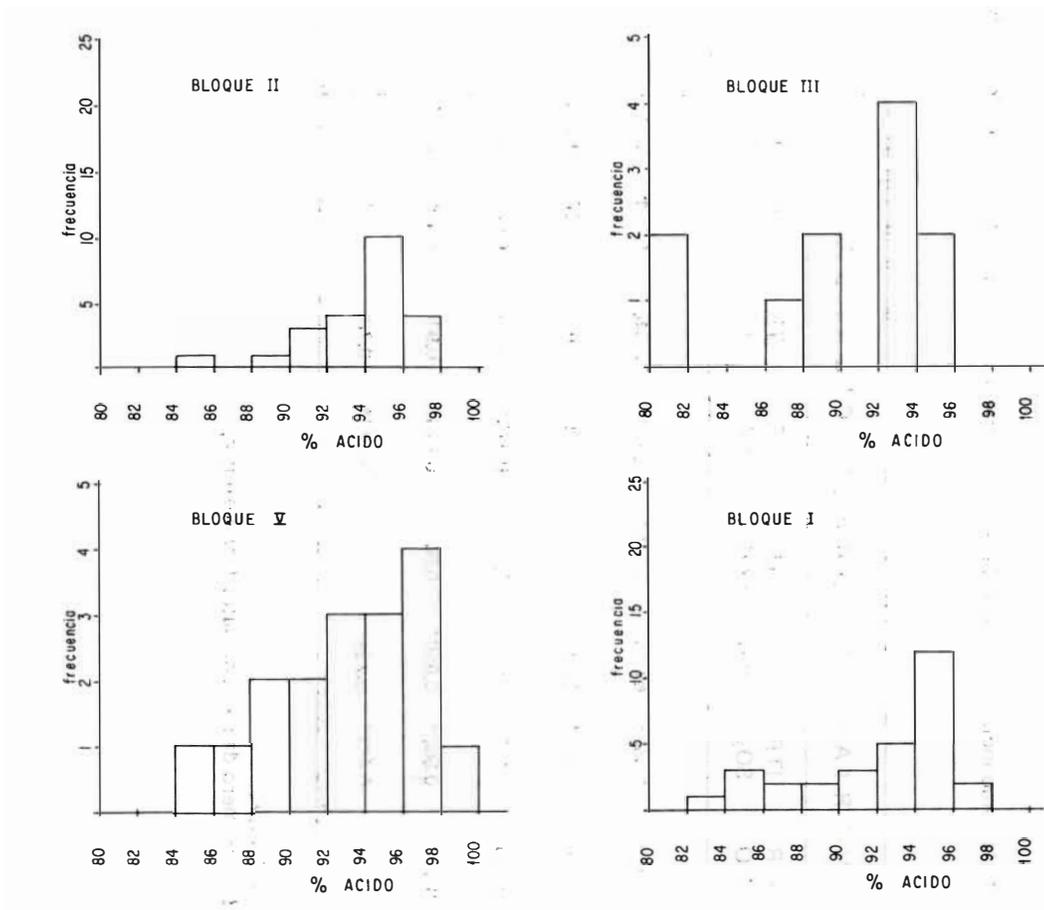


FIG. 91: Histogramas de % de ácidos por bloque.

En la Figura 105 se representa el % de Fe_2O_3 contra la diferencia entre las temperaturas de deformación inicial en atmósferas reductora y oxidante, observándose una relación directa con coeficiente de correlación de 0.82; es decir, a medida que aumenta el contenido de hierro en la muestra aumenta la diferencia entre estas dos temperaturas, evidenciando las diferencias en acción fundente que tienen el Fe_2O_3 y el FeO .

Respecto al SO_3 , en los bloques V, II y III presenta correlación negativa con ITR lo cual debe ser consecuencia de su aso-

ciación con el hierro, lo que se evidencia por su comportamiento deferente en el Bloque I en el cual no hay correlación $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3$.

8.3.7. CORRELACION ENTRE FUSIBILIDAD Y PARAMETROS CALCULADOS

En la Tabla 56 se encuentran también los coeficientes de correlación entre ITR y los parámetros calculados a partir de la composición de las muestras.

La correlación ITR - % de bases es negativa, confirmando la acción del hierro,

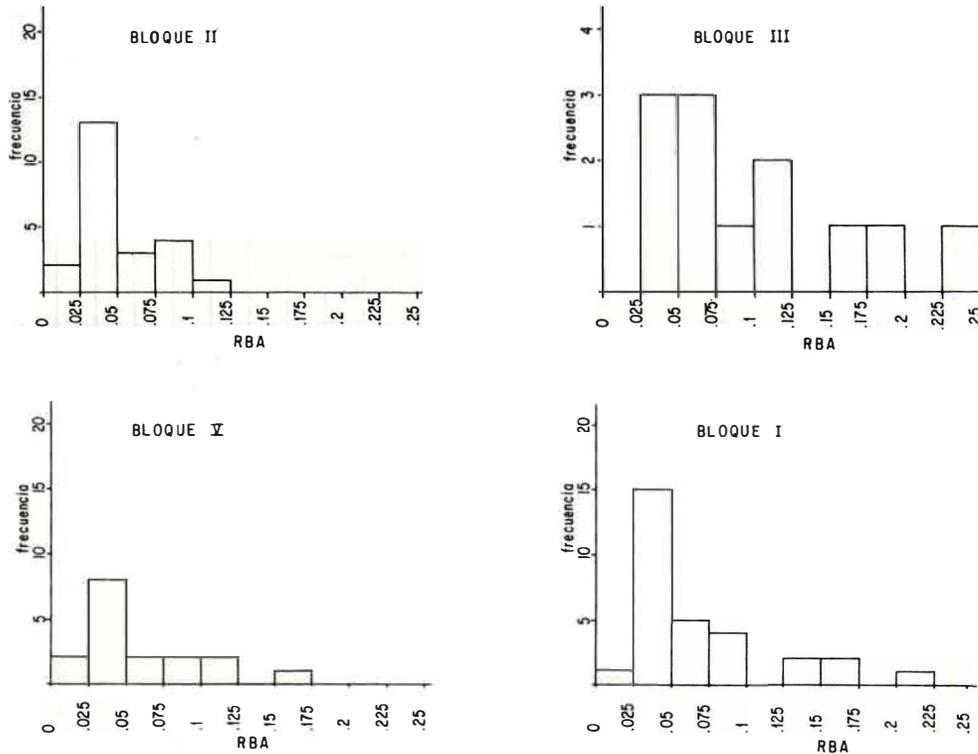


FIG. 92: Histogramas de relación base-ácido (Rba) por bloque.

calcio y magnesio como fluidizantes especialmente en presencia de un exceso de SiO₂. Por el contrario, los coeficientes de correlación ITR- %de ácidos son positivos, significativos especialmente en el Bloque III.

La influencia que tiene el aumento del %de bases en la fusibilidad se ilustra en la Figura 102 en la que se observa la disminución de la temperatura de deformación inicial al aumentar el %de bases. Es de anotar

que para las muestras ligníticas Nos. 151354, 151395 y 151377 este efecto es mayor.

El resultado de la Figura 102 se ajusta al comportamiento teórico que se ilustra en la Figura 106 teniendo en cuenta la zona de esta figura en que se localizan las muestras.

Como consecuencia de lo anterior y dado que las muestras de la zona tienen alto

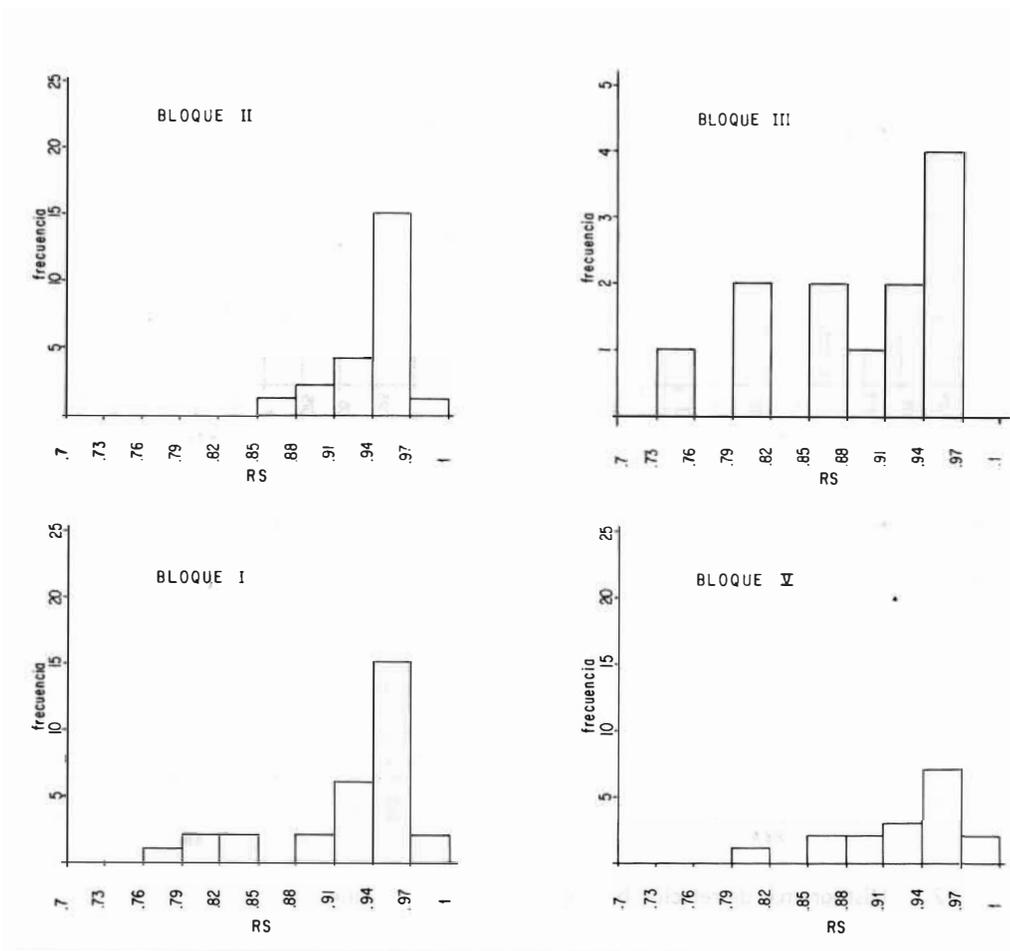


FIG. 93: Histogramas de relación sílica por bloque.

% de ácidos, la correlación ITR-Relación base-ácido es inversa como lo muestran los coeficientes de correlación negativos.

La correlación ITR-Relación sílica es positiva, significativa como consecuencia de la influencia del % de SiO_2 ; es interesante

anotar que presenta la mejor correlación entre los parámetros que se calcularon, lo cual indica que para el caso de muestras ácidas como éstas el % de SiO_2 es definitivo en la predicción de las propiedades de fusión, las cuales son reducidas por el hierro, calcio y magnesio principalmente. La Figura 103 ilustra esta relación; de nuevo las muestras

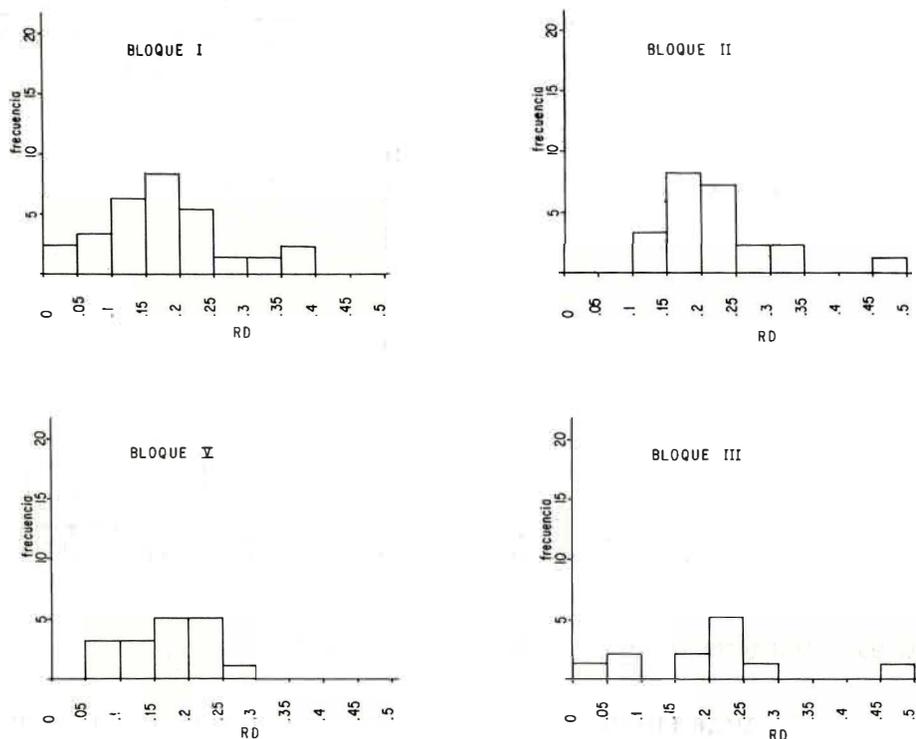


FIG. 94: Histogramas de relación dolomita (RD) por bloque.

Nos. 152354, 151377 y 151395 muestran un efecto más acentuado.

La relación dolomita no muestra en general una correlación bien definida a excepción del Bloque II; probablemente esto se debe a que siendo el % de bases bajo, la influencia del calcio y magnesio expresados como porcentaje sobre las bases totales no es muy grande.

La relación silicio-aluminio tampoco muestra una correlación definida con ITR; también en este caso por el predominio de ácidos y la probable presencia de los óxidos de aluminio y silicio libres, éstos se constituyen en dos factores con un mismo efecto de manera que la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ no tiene correlación definida a través del rango de valores.

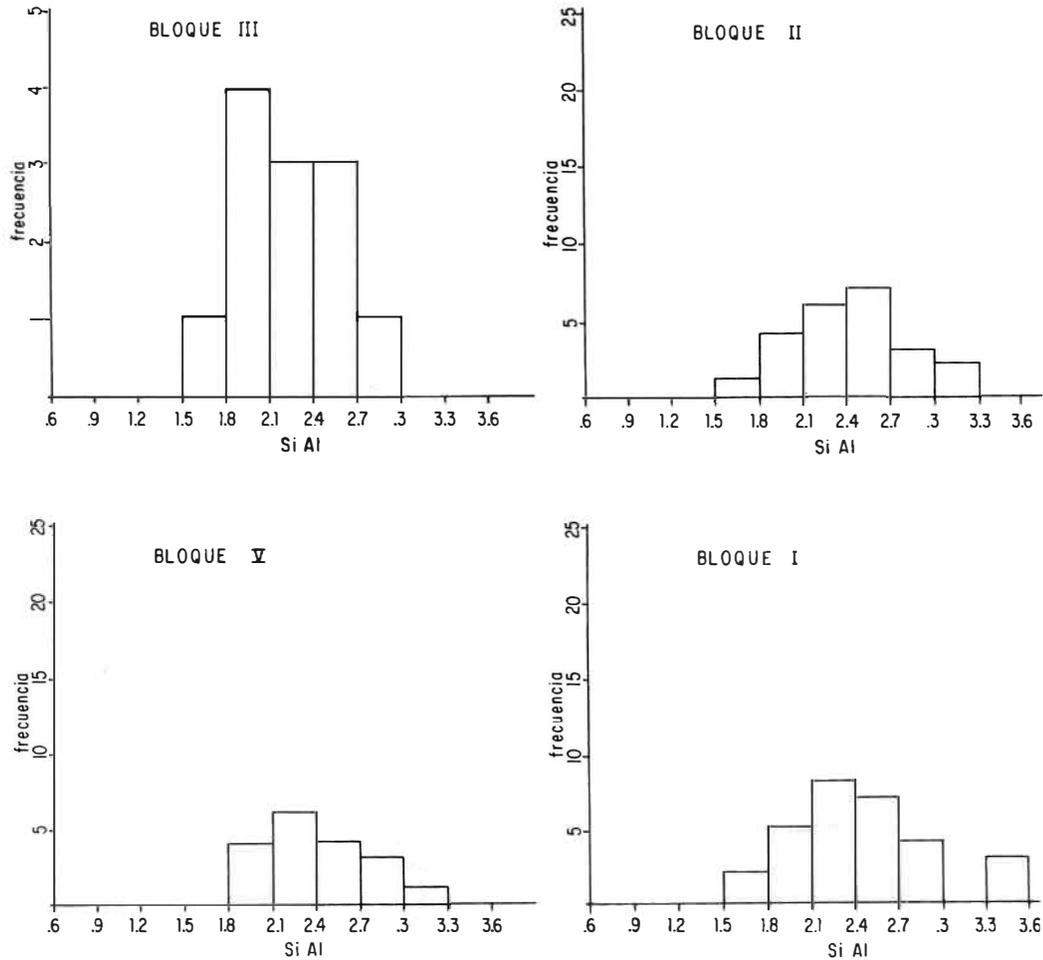


FIG. 95: Histogramas de relación silicio-aluminio por bloque.

9. LAVABILIDAD

El éxito potencial del beneficio depende de las propiedades innatas del carbón a ser procesado; éstas varían ampliamente según ubicación geográfica, rango y manto, y a menudo dentro de un manto extraído de la misma mina. Cada carbón difiere en naturaleza y cantidad de impurezas removibles, por lo que cada cual tiene características de lavabilidad individuales.

Con el fin de resolver si puede un carbón ser beneficiado y qué resultados pueden

esperarse, se efectúa el análisis de lavabilidad; éste se logra mediante procedimientos de laboratorio diseñados para determinar la facilidad o dificultad con la cual las diferentes impurezas, especialmente cenizas y azufre pirítico, pueden removerse del carbón bruto para producir uno más limpio.

Las partículas de pirita en muchos carbones son menores de 1 micrón y en la práctica, las menores de 50 micrones no pueden separarse de las otras. Aún las partículas de 0.5 mm son difíciles de remover eficientemente, mientras que las grandes a pesar de

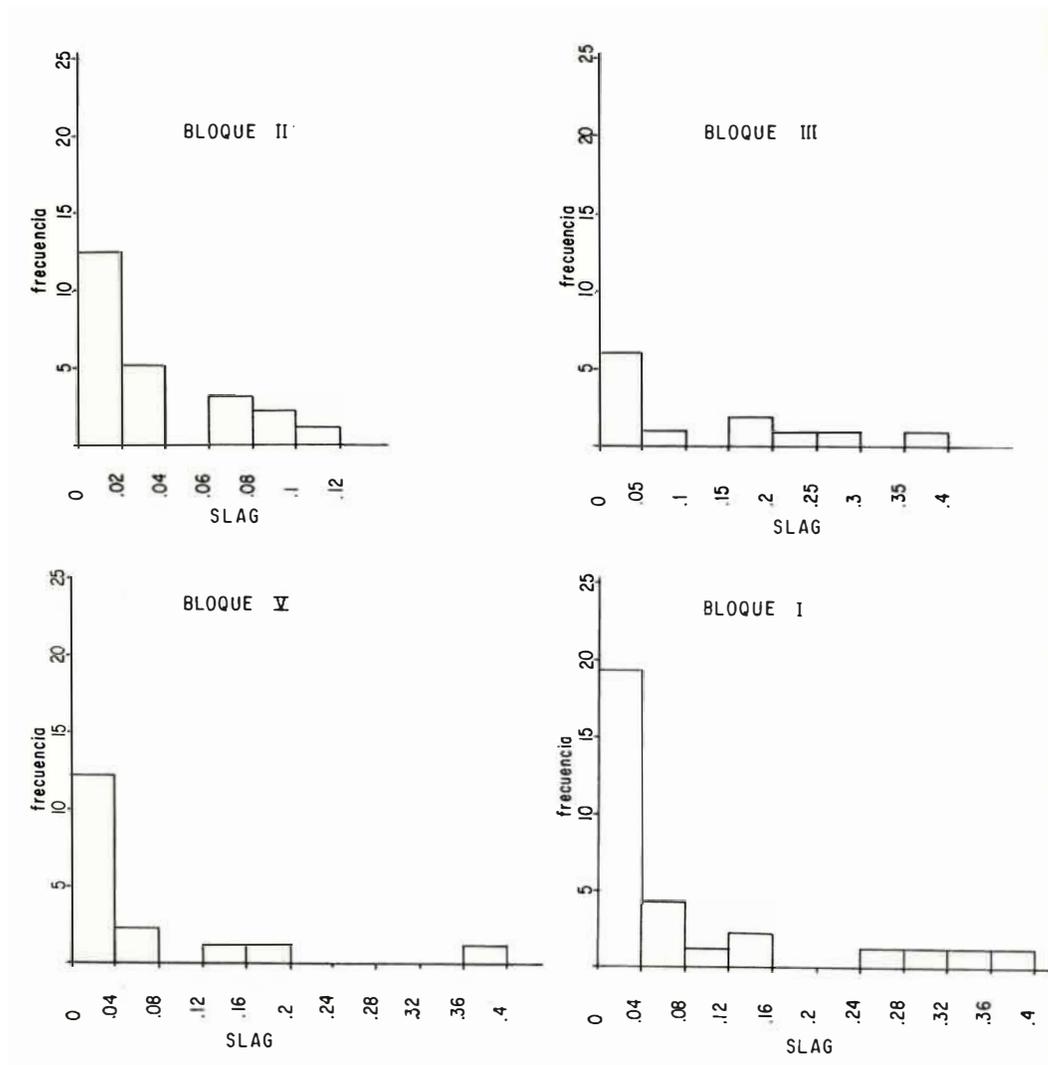


FIG. 96: Histogramas de factor de Slagging por bloque.

ser menos homogéneas en composición, responden más fácilmente a la separación por gravedad. Para ser separables por gravedad, las partículas que contienen impurezas deben estar libres y tener densidades mayores que las partículas de un carbón puro.

Si una partícula de pirita de 0.005 mm está en una partícula de carbón de 1.5 mm flotará con el producto de carbón limpio

aumentando el contenido de azufre de éste. La dificultad para separar las pequeñas partículas (por debajo de 50 μ) viene de su baja respuesta a la aceleración de la gravedad. Las dificultades técnicas implicadas en la separación de pequeñas partículas ocasiona el aumento de los costos a medida que el tamaño disminuye (PHILLIPS, 1978).

Como los carbones de la zona Checu - Lenguazaque son bituminosos de

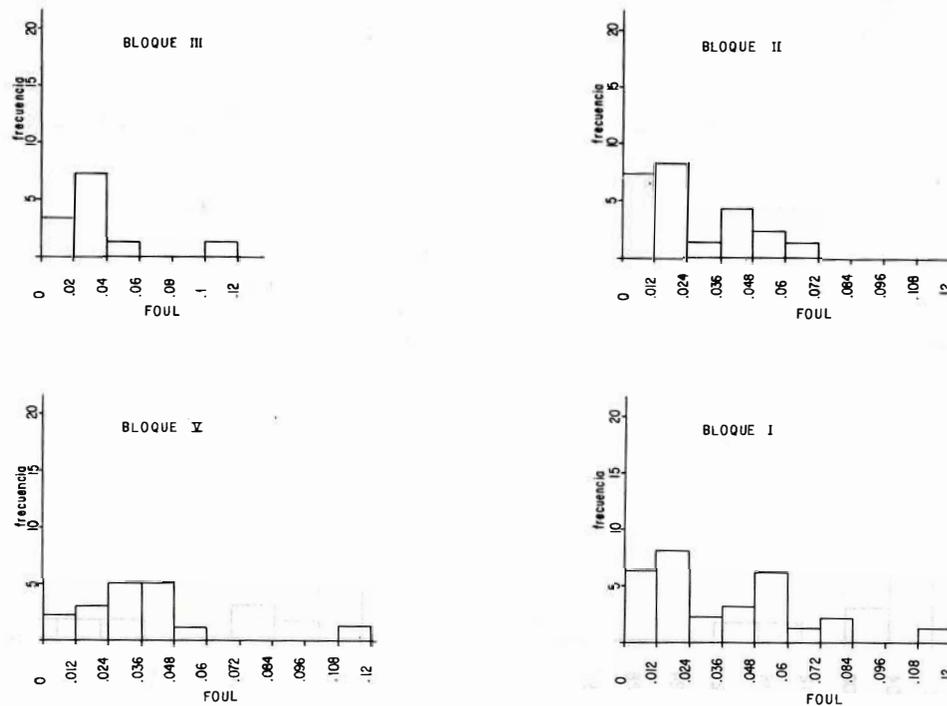


FIG. 97: Histogramas de factor de Fouling por bloque.

bajo, medio y alto contenido de materias volátiles, con buenas características de coquización, adquiere gran importancia el beneficio de los mismos tanto para reducir al máximo el contenido de azufre y cenizas, como para obtener carbones más homogéneos en composición para un eficiente uso.

En el caso de carbones sub-bituminosos o ligníticos, es difícil justificar económicamente el beneficio; éstos son frecuentemente comercializados sólo después de reducir su tamaño. Aún el secado térmico para reducir la humedad inherente parece costar más que el flete correspondiente (PHILLIPS, 1978).

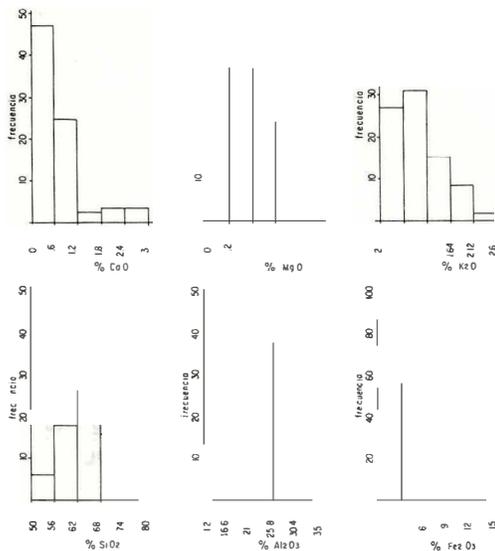


FIG. 98: Histogramas generales.

9.1. METODO DE ANALISIS DE LAVABILIDAD

El procedimiento empleado llamado prueba de flotación e inmersión, consiste en determinar el porcentaje en peso y la composición química de los productos flotante y sumergido, en cada uno de los líquidos de diferente gravedad específica.

La serie de densidades para los ensayos fue 1.30, 1.50 y 1.80, con la cual se obtienen las cuatro fracciones siguientes: (1) flotante a 1.30, (2) sumergida a 1.30- flotante a 1.50, (3) sumergida a 1.50- flotante a 1.80, y (4) sumergida a 1.80. Los líquidos ajustados a las densidades citadas fueron obtenidos mediante mezclas de nafta y bromoformo. Aunque estos líquidos presentan los inconvenientes de gran toxicidad y alto costo, fueron preferidos porque a diferencia de las soluciones de cloruro de zinc, no tienen prácticamente ningún efecto sobre las propiedades coquizantes, de gran interés para los carbones estudiados, y además sus residuos en el carbón lavado son de fácil eliminación (CERCHAR, Publication No. 1585).

Con la muestra de ensayo consistente en una porción representativa del testigo se

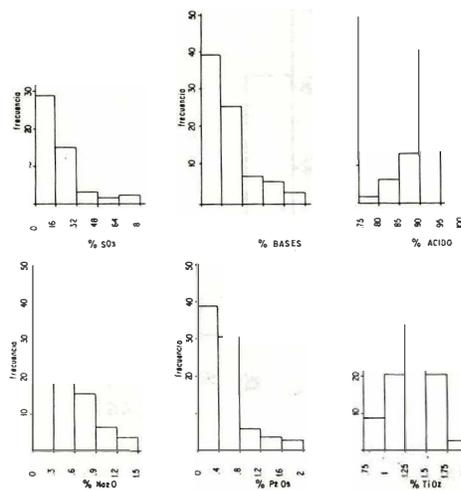


FIG. 99: Histogramas generales.

cado al aire, de aproximadamente 300 g y con tamaño de partícula superior a 0.6 mm (malla 30) e inferior a 4.76 mm (malla 4), se efectúa las siguientes operaciones:

- a) Colocar en el líquido de separación la muestra a analizar, teniendo cuidado que el espesor de la capa no sobrepase 3 veces el diámetro de la partícula mayor.
- b) Provocar la separación agitando el material dentro del líquido denso; dejando reposar durante 2 a 3 minutos.
- c) Recoger el producto flotante mediante una cuchara de malla metálica y pasarlo a filtración al vacío en embudo Buchner.
- d) Agitar nuevamente el material en el líquido, recoger los flotantes y recomenzar la operación hasta que no sobrenada ninguna partícula de carbón. Adicionar a los flotantes aproximadamente la mitad de los granos indecisos.
- e) Filtrar el producto sumergido, colocarlo en el líquido siguiente y así sucesivamente.

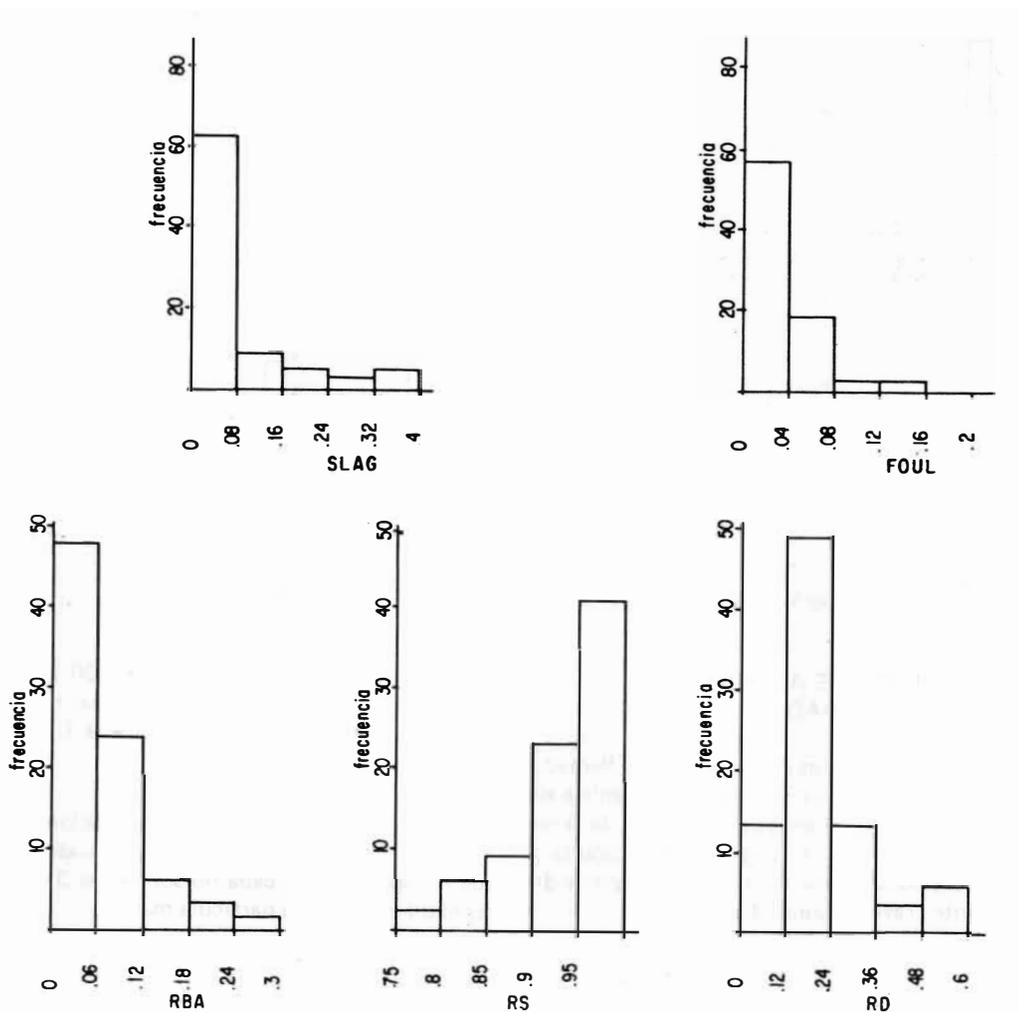


FIG. 100: Histogramas generales.

- f) Filtrar las diversas fracciones aisladas, secarlas y pesarlas.
- g) Efectuar el análisis químico de las fracciones.

Con el fin de reducir al máximo las manipulaciones eliminando lo más rápidamente posible la mayor proporción de la muestra, se procedió en orden ascendente de densidad de los líquidos.

Si bien el peso de la muestra analizada y la escala de densidades, pueden estimar-

se insuficientes con miras a establecer detalladamente la curva de lavabilidad, se consideran útiles para propósitos de comparar en forma relativa el comportamiento de los diferentes carbones de la zona, además de dar una orientación general sobre la facilidad de lavado de cada uno de ellos.

Se efectuó este análisis con los carbones de contenido de cenizas superior al 10 %, aprovechando el ensayo no sólo para fijar características de lavabilidad, sino también con el fin de obtener una muestra adecuada para la clasificación Internacional.

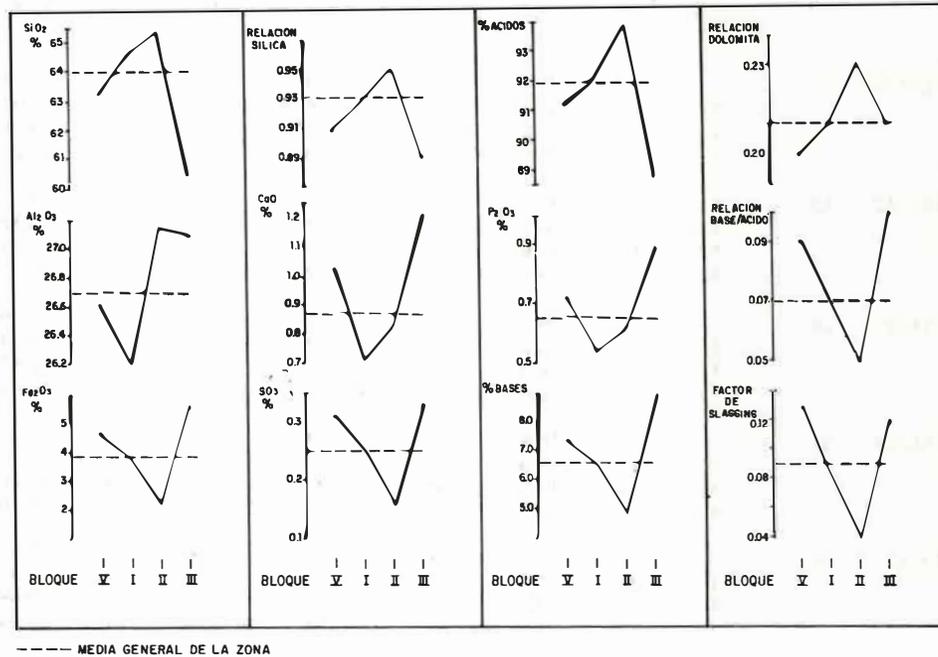


FIG. 101: Comparación de medias de algunas variables por bloque.

9.2. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LAVABILIDAD

En las Tablas 57 y 58 se muestran los resultados de la prueba de lavabilidad; en ellas se dan el porcentaje en peso y el contenido de cenizas para cada fracción densimétrica y los correspondientes valores acumulativos para el producto flotante. Los resultados son también presentados gráficamente en las curvas A y B de las Figuras 108 a 111.

Los datos de composición química para la muestra antes y después del proceso de lavado, se resumen en la Tabla 59.

9.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Como se observa en las Tablas 57 y 58 y en las figuras 108 a 111, para la mayoría de los carbones estudiados los requerimientos para el producto flotante, de alto rendimiento y contenido de cenizas de 10% o menos, se logran a una gravedad específica

TAB. 57: Características de lavabilidad de los carbones de la Zona Checua - Lenguaque.
Tamaño de partícula: 0.6 mm x 4.76 mm - Bloque I.

Muestra No.IGM	No. de Campo GBS	Densidad		Masa % P	Cenizas %Cz	P x Cz	$\Sigma P \times Cz$	Flotante acumulativo		
		Sumerg.	Flot.					%P	%Cz	
BLOQUE I										
151368	15		1.3	16.4	4.78	78.39	78.39	16.4	4.78	
			1.3	1.5	74.2	12.63	937.15	1015.54	90.6	11.21
			1.5	1.8	8.7	37.01	321.99	1337.53	99.3	13.47
			1.8		0.7				100.0	
151370	17		1.3	25.5	5.18	132.09	132.09	25.5	5.18	
			1.3	1.5	53.1	12.75	683.40	815.49	79.1	10.31
			1.5	1.8	15.3	38.52	589.36	1404.85	94.4	14.88
			1.8		5.6	56.26	315.06	1719.91	100.0	17.20
151372	19		1.3	28.3	4.31	124.80	124.80	28.	4.41	
			1.3	1.5	55.2	13.09	722.57	847.37	83.	10.15
			1.5	1.8	11.9	38.72	460.77	1308.14	95.4	13.71
			1.8		4.6	58.96	271.22	1579.36	100.0	15.79
151382	29		1.3	35.5	5.00	177.50	177.50	35.5	5.00	
			1.3	1.5	50.2	13.10	657.62	835.12	85.7	9.74
			1.5	1.8	8.3	4.62	337.15	1172.27	94.0	12.47
			1.8		6.0	64.34	386.04	1558.31	100.0	15.58
151384	31		1.3	16.8	2.31	38.81	38.82	16.8	2.31	
			1.3	1.5	59.5	11.14	662.83	701.64	76.3	9.23
			1.5	1.8	13.9	35.68	495.95	1197.59	90.2	13.28
			1.8		9.8	72.71	712.56	1910.15	100.0	19.10
151419	66		1.3	34.6	1.84	63.66	63.66	34.6	1.85	
			1.3	1.5	31.5	9.04	284.76	348.42	66.1	5.31
			1.5	1.8	9.9	38.18	477.98	726.40	76.0	9.64
			1.8		24.0	72.76	1746.24	2472.64	100.0	25.10
151422	69		1.3	59.7	2.63	157.01	157.01	59.7	2.63	
			1.3	1.5	27.3	8.04	219.49	376.50	87.0	4.33
			1.5	1.8	3.4	40.09	136.31	512.81	90.4	5.67
			1.8		9.6	73.60	706.56	1219.37	100.0	12.19
151428	75		1.3	12.8	5.44	69.63	69.63	12.8	5.44	
			1.3	1.5	58.2	11.50	669.30	738.93	71.0	10.41
			1.5	1.8	12.0	41.96	503.52	1242.45	83.0	14.97
			1.8		17.0	80.79	1373.42	2615.88	100.0	26.16
151430	77		1.3	51.9	1.69	87.71	87.71	51.9	1.69	
			1.3	1.5	14.3	9.81	140.28	227.99	66.2	3.44
			1.5	1.8	1.5	36.82	55.23	283.22	67.7	4.18
			1.8		32.3	83.31	2690.91	2974.13	100.0	29.74
151432	79		1.3	42.8	4.05	173.34	173.34	42.8	4.05	
			1.3	1.5	44.3	14.69	650.77	824.11	87.1	9.46
			1.5	1.8	8.6	40.44	347.78	1171.89	95.7	12.24
			1.8		4.3	70.71	304.05	1475.94	100.0	14.76

TAB. 58: Características de lavabilidad de los carbones de la Zona Checua - Lenguaque.
 Tamaño de partícula: 0,6 mm x 4.76 mm - Bloques II, III y V.

Muestra No.IGM	No. de Campo GBS	Densidad		Masa % P	Cenizas % Cz	P x Cz	$\Sigma P \times Cz$	Flotante acumulativo	
		Sumerg.	Flot.					%P	%Cz
BLOQUE II									
151379	26		1.3	42.0	4.59	192.78	192.78	42.0	4.59
			1.5	37.1	14.00	519.40	712.18	79.1	9.00
			1.8	18.0	38.71	696.78	1408.96	97.1	14.51
			1.8	2.9	63.78	184.96	1593.92	100.0	15.94
151392	39		1.3	60.6	5.61	339.97	339.97	60.6	5.61
			1.5	29.5	17.66	520.97	860.94	90.1	9.56
			1.8	5.1	42.92	218.89	1079.83	95.2	11.34
			1.8	4.8	70.95	340.61	1420.44	100.0	14.20
151407	54		1.3	71.6	14.24	303.58	303.58	71.6	4.24
			1.5	15.2	16.41	249.93	553.01	86.8	6.37
			1.8	4.6	43.22	198.81	751.82	91.4	8.22
			1.8	8.6	73.62	633.13	1384.95	100.0	13.85
BLOQUE III									
151358	5		1.3	56.3	4.98	280.37	280.37	56.3	4.98
			1.5	28.5	14.88	424.08	704.45	84.8	8.31
			1.8	9.9	42.57	421.44	1125.89	94.7	11.89
			1.8	5.3	65.63	347.84	1473.73	100.0	14.74
151359	6		1.3	62.0	3.01	186.62	186.62	62.0	3.01
			1.5	28.3	13.42	379.79	566.41	90.3	6.27
			1.8	4.0	39.79	159.16	715.57	94.3	7.69
			1.8	5.7	75.82	432.17	1157.74	100.0	11.58
151362	9		1.3	67.4	5.54	373.40	373.40	67.4	5.54
			1.5	27.7	14.09	390.29	763.69	5.1	8.03
			1.8	1.6	35.97	57.55	821.24	96.7	8.49
			1.8	3.3	74.56	246.05	1067.29	100.0	10.67
151423	70		1.3	71.3	2.82	201.07	201.07	71.3	2.82
			1.5	12.7	15.14	192.28	393.35	84.0	4.68
			1.8	5.8	39.58	229.56	622.91	89.8	6.94
			1.8	10.2	76.94	784.79	1407.70	100.0	14.08
BLOQUE V									
151402	49		1.3	22.8	2.89	65.89	65.89	22.8	2.89
			1.5	62.1	13.52	839.59	905.42	84.9	10.70
			1.8	13.5	33.42	451.31	1356.79	98.4	13.79
			1.8	1.6	54.51	87.22	1444.01	100.0	14.44
151409	56		1.3	37.8	4.95	187.11	187.11	37.8	4.95
			1.5	46.8	17.19	809.77	996.28	84.6	11.78
			1.8	10.4	41.31	429.62	1425.90	95.0	15.01
			1.8	5.0	52.76	263.80	1689.70	100.0	16.90
151411	58		1.3	45.2	2.96	133.79	133.79	45.2	2.96
			1.5	42.5	21.82	927.35	1061.14	87.7	12.10
			1.8	7.5	34.85	261.38	1322.52	95.2	13.89
			1.8	4.8	61.50	295.10	1617.72	100.0	16.18
151412	59		1.3	45.8	4.01	183.66	183.66	45.8	4.01
			1.5	46.2	13.49	623.24	806.90	92.0	8.77
			1.8	7.4	38.04	281.50	1088.40	99.4	10.95
			1.8	0.6	56.87	34.12	1122.52	100.0	11.22

TAB. 59: Comparación del análisis de los carbones brutos y lavados de la Zona Checua - Lenguaque

Muestra No.IGM	No. de Campo GBS	Densidad	Rendimiento Flotante %	Cenizas %	Materias Volátiles %	Poder Calorífico cal/g	Azufre Total %	Indice Hincha- miento	Dilatación %	Clasificación Internacional
Resultados en base seca										
BLOQUE I										
151368	15			15.3	26.0	7149	1.54	6.0	210	535
	15L	1.50	90.6	11.2	25.2	7436	1.40			535
151370	17			15.1	25.8	7249	2.10	7.0	240	535
	17L	1.50	79.1	10.3	25.0	7622	1.61			435
151372	19			16.6	26.5	7157	2.15	6.5	220	535
	19L	1.50	83.5	10.2	27.7	7605	1.58			535
151382	29			16.6	25.1	7086	1.18	6.0	200	535
	29L	1.50	85.7	9.7	26.8	7795	1.14			535
151384	31			15.5	18.2	7257	0.78	7.0	45	433
	31L	1.50	76.3	9.2	20.9	7840	0.86		100	434
151422	69			12.0	18.3	7683	0.46	8.5	45	433
	69L	1.80	90.4	5.7	21.9	8177	0.52	9.0	85	434
151419	6E			25.8	19.1	6293	0.87	5.0	100	434
	66L	1.80	76.0	9.6	24.8	7779	0.84	8.0	180	435
151428	75			23.9	17.9	6413	0.64	8.5	45	433
	75L	1.50	71.0	10.4	18.8	7431	0.69	9.0	150	435
151430	77			26.3	16.6	6303	0.46	6.0	-20	432
	77L	1.80	67.7	4.2	22.6	8177	0.62	9.0	60	434
151432	79			14.6	21.4	7386	0.68	8.5	200	435
	79L	1.50	87.1	9.5	28.4	7735	0.79			535
BLOQUE II										
151379	26			14.6	26.0	7136	1.19	6.5	200	535
	26L	1.50	79.1	9.0	27.7	7677	0.98			535
151392	39			11.8	31.2	75.31	1.09	7.5	280	635
	39L	1.50	90.1	9.6	32.4	7740	1.07			635

Continúa

Continuación Tabla 59.

Muestra No.IGM	No. de Campo GBS	Densidad	Rendimiento Flotante %	Cenizas %	Materias Volátiles %	Poder Calorífico cal/g	Azufre Total %	Indice Hinchamiento	Dilatación %	Clasificación Internacional
Resultados en base seca										
151407	54			12.0	26.0	7555	0.52	8.0	230	535
	54L	1.80	91.4	8.2	26.0	7942	0.62			535
BLOQUE III										
151358	5			17.1	32.7	6721	1.78	3.0	-8	622
	5L	1.50	84.8	8.3	36.1	7459	1.84	4.5	-3	632
151359	6			12.1	34.4	7341	1.44	3.5	25	623
	6L	1.80	94.3	7.7	35.8	7710	1.48	4.5	60	634
151362	9			11.2	29.5	7341	1.35	3.5	-5	622
	9L	1.80	96.7	8.5	31.5	7608	0.77	7.5	25	633
151423	70			15.1	26.0	7200	0.48	6.0	130	534
	70L	1.80	89.8	6.9	27.4	7878	0.52	9.0		53 (5)
BLOQUE V										
151402	49			13.2	17.6	7453	0.56	7.0	40	433
	49L	1.50	84.9	10.7	19.0	7674	0.61	9.0	90	434
151409	56			17.6	22.9	7061	2.35	6.5	170	435
	56L	1.30	37.8	5.0	28.0	8281	0.93			535
151411	58			14.1	22.7	7355	1.63	6.0	95	434
	58L	1.30	45.2	3.0	27.0	8430	0.96	9.0	210	435
151412	59			11.9	24.7	7534	1.13	7.0	220	535
	59L	1.50	92.0	8.8	27.4	7870	0.92			535

L: Muestra lavada a la densidad anotada.

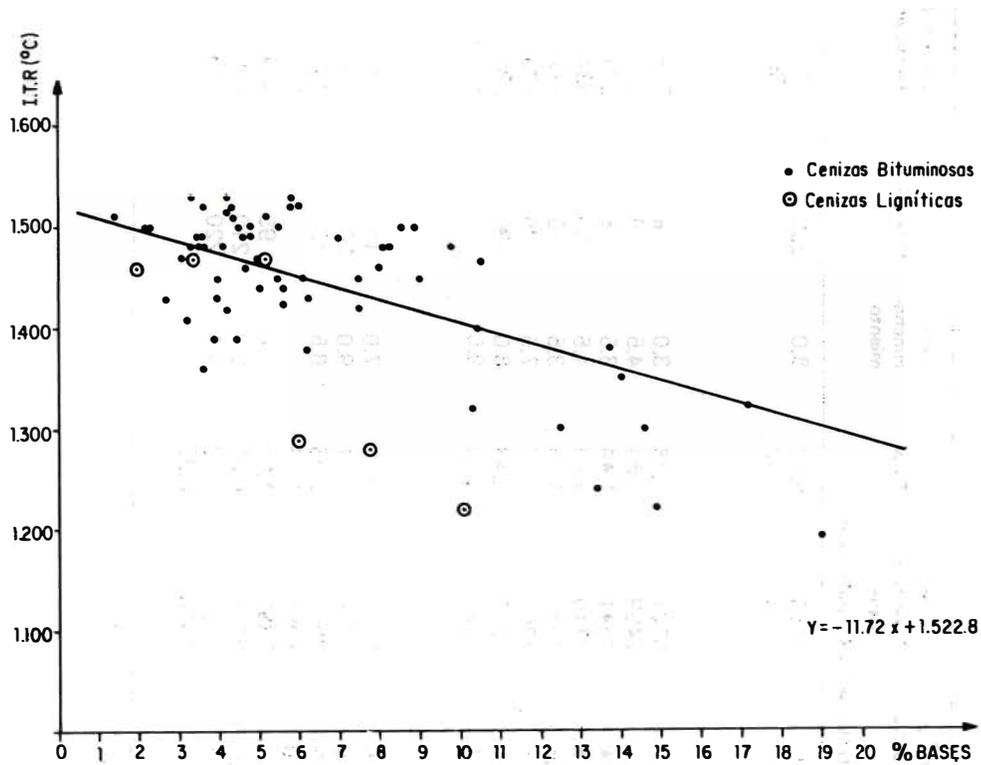


FIG. 102: Temperatura de deformación inicial en atmósfera reductora vs. % de bases.

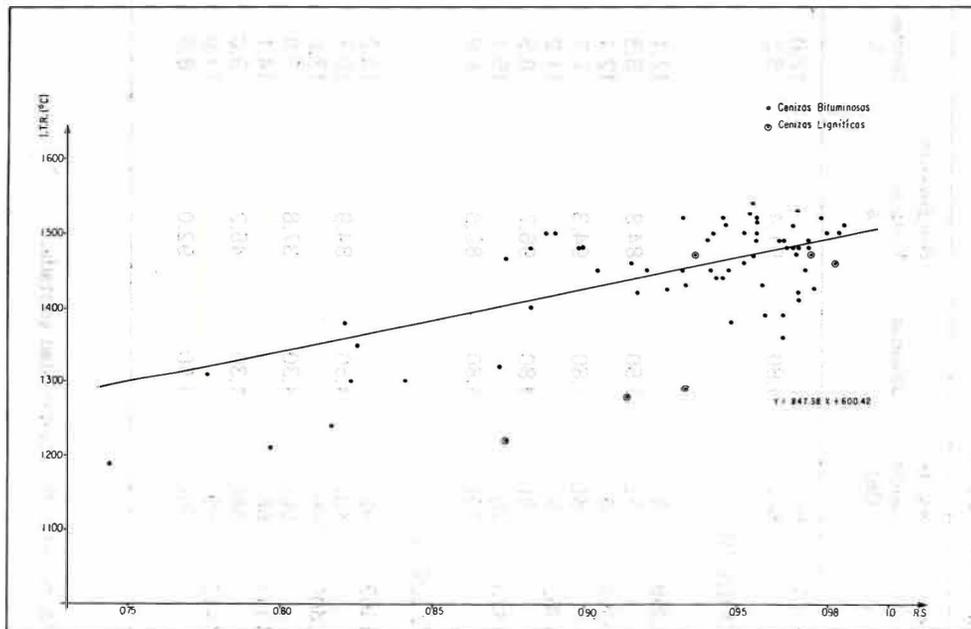


FIG. 103: Temperaturas de deformación inicial en atmósfera reductora vs. relación sílica.

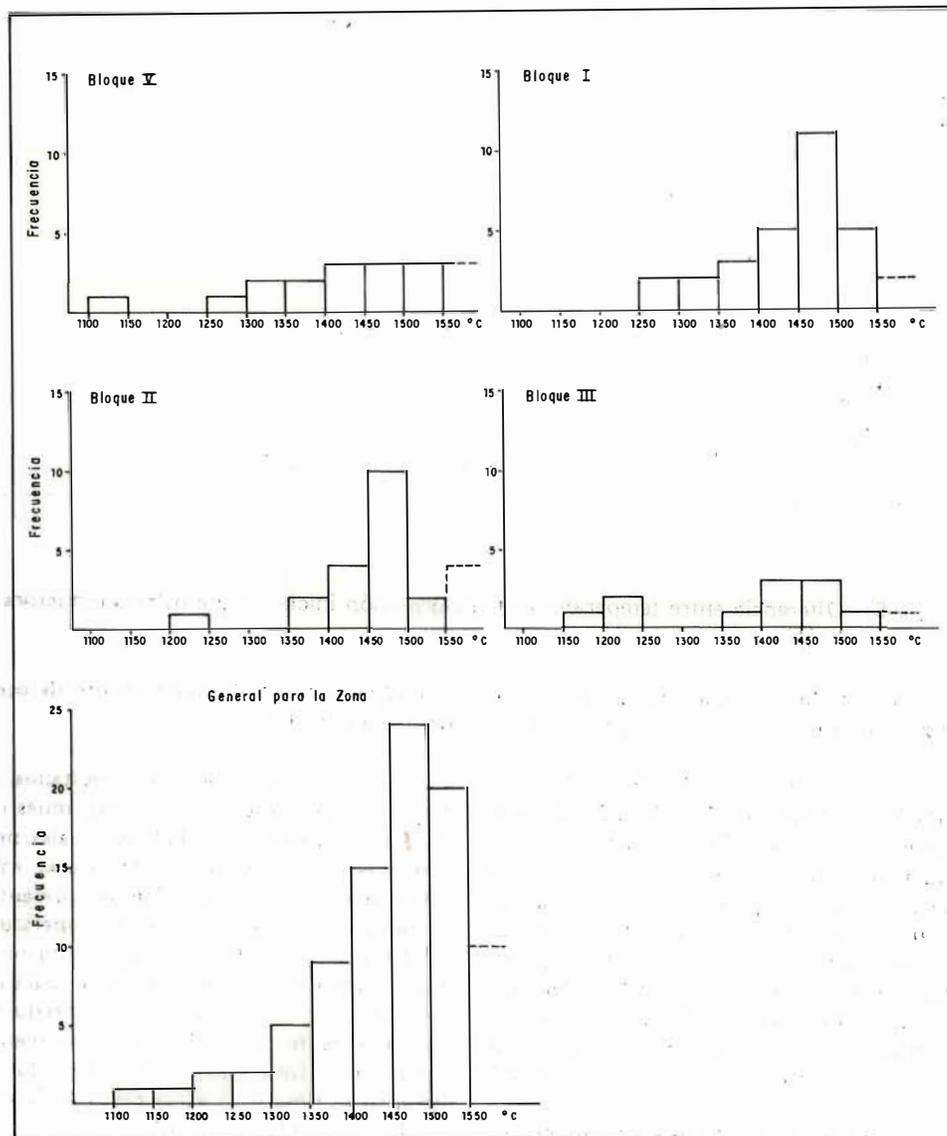


FIG. 104: Histogramas de ITR por bloque general.

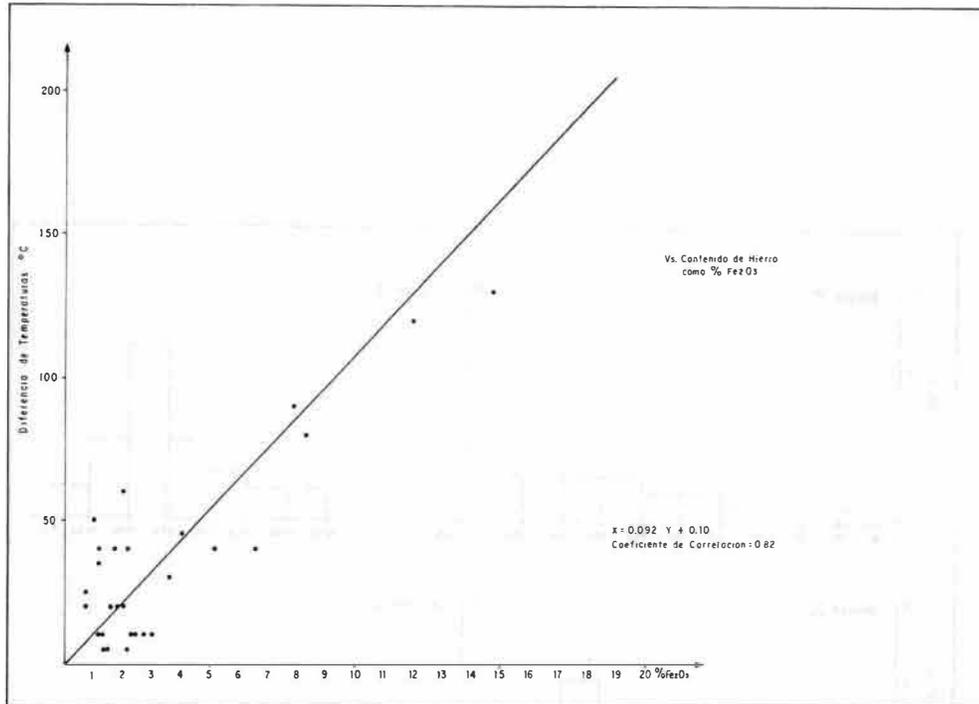


FIG. 105: Diferencia entre temperaturas de deformación inicial en atmósferas reductora y oxidante.

• de 1.50; este hecho indica que en general las impurezas presentes son de fácil remoción.

Los carbones 151359, 151362, 151407, 151419, 151422, 151423 y 151430 sobresalen por sus mejores características de lavabilidad, puesto que con una gravedad específica de 1.80 pueden ser removidas sus impurezas minerales hasta un tenor inferior de 10%, con el consiguiente aumento del rendimiento. Este hecho es también evidente por la menor pendiente presentada por las correspondientes curvas B de las figuras citadas, indicativa de buena lavabilidad.

Con el carbón 151430 se obtiene una reducción de cenizas de 26.3% de la muestra bruta a 4.2% del producto flotante a una densidad de 1.80, lo cual indica que aún con una gravedad específica superior a este valor,

se podría cumplir el requerimiento de cenizas inferior de 10%.

El contraste con estos resultados, se presentan los obtenidos con las muestras 151368, 151409 y 151411, las cuales presentan la mayor dificultad de lavado; esto indica que las impurezas minerales presentes en esos carbones están finamente dispersadas o íntimamente ligadas a la materia orgánica. A una densidad de 1.50 aún no se logra un producto limpio y a 1.30, si bien se reducen sustancialmente las cenizas, el rendimiento es muy bajo. De las curvas se deduce que la densidad óptima para estos casos sería mayor de 1.30 e inferior a 1.50.

En el caso del carbón 151368, se dan los análisis químicos (Tabla 57) de la fracción que flota a una gravedad específica de

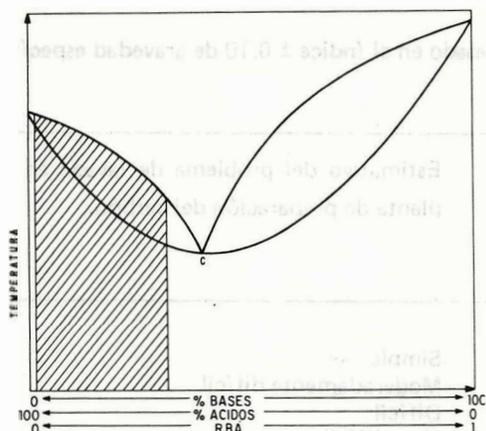


FIG. 106: Diagrama de fases idealizado para dos componentes temperatura de fusión vs. composición.

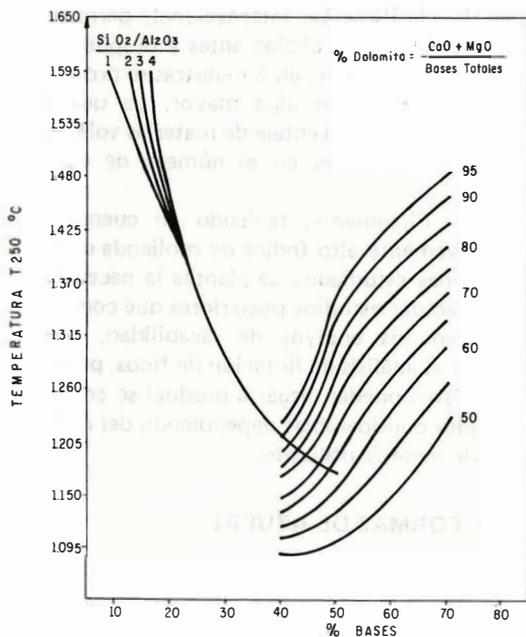


FIG. 107: Temperatura T 250 vs. composición de la ceniza.

1.50, a pesar del alto contenido de cenizas obtenido para la misma; ya que a 1.30 aunque se cumple el requisito de bajas cenizas, el rendimiento de flotante es de sólo 16.4%, lo cual corresponde a una baja porción de la muestra original y por lo tanto no

es representativa, e implica una pérdida considerable de carbón junto con los esquistos.

La facilidad o dificultad del beneficio en la planta de preparación puede estimarse de acuerdo a Mitchel (LOWRY, 1963), de la cantidad de material de gravedad cercana a la gravedad específica a ser usada para lavar el carbón. Esta cantidad de material está definida como el porcentaje de carbón que flota en el rango de ± 0.10 de gravedad específica a cualquier gravedad específica dada. La Tabla 60 muestra los estimativos del problema de lavado, basados en esta consideración.

Los índices obtenidos para las muestras lavadas de la zona bajo estudio, a las gravedades específicas de 1.40, 1.50, 1.60 y 1.70, están dadas en la Tabla 61. Estos se encuentran representados gráficamente por las curvas C, construidas con base en los datos de rendimiento, de las Figuras 108 a 111.

Se acepta comúnmente que un índice menor de 7 corresponde a una separación simple, mientras que uno de 25 o superior, significa un problema excesivamente difícil en el lavado del carbón.

Según este criterio, con los carbones 151407, 151423 y 151430, cabe esperarse la mayor facilidad de lavado en la planta de operación.

Los estimativos dados por Mitchel son válidos para separaciones realizadas en equipos tales como clasificadores hidráulicos (jigs) o mesas de concentración; pero se encuentra que trabajando con medios densos pueden efectuarse separaciones con eficiencias muy altas, aún en el caso de obtener un índice de 50 de la curva de ± 0.10 de gravedad específica. (PHILLIPS, 1978). Tal es el caso de los carbones estudiados, ya que de las curvas de lavabilidad se deduce que poseen en general buenas características de lavado, aunque los índices de ± 0.10 de gravedad específica, dan valores relativamente altos.

TAB. 60: Estimativo del problema de lavado basado en el índice ± 0.10 de gravedad específica (LOWRY, 1963).

Cantidad del material entre ± 0.10 de la gravedad específica de lavado.		Estimativo del problema de lavado en la planta de preparación del carbón.
Mayor de	Menor de	
0 %	7 %	Simple
7 %	10 %	Moderadamente difícil
10 %	15 %	Difícil
15 %	20 %	Muy difícil
20 %	25	Excesivamente difícil
25 %		Prácticamente imposible

De la comparación del análisis químico de las muestras antes y después del lavado (Tabla 59) se observa una notable variación de las características de los carbones; se produce en general aumento de volátiles y un marcado aumento del poder calorífico acorde con la sustancial reducción de cenizas; se disminuye el azufre total mediante lavado solamente en 8 de las 21 muestras tratadas, mientras que en las demás o bien permanece igual o aún aumenta el contenido de azufre en el producto flotante.

Con fines de clasificación se efectuó el análisis dilatométrico, y la determinación de índice de hinchamiento en los carbones que presentarían antes del lavado dilatación inferior a 140 % e hinchamiento menor de 4, observándose en todos los casos un notable aumento de estas dos medidas mediante el lavado; excepto en la muestra 151358, cuya dilatación varía muy poco, de -8 a -3% lo cual confirma que este valor bajo es debido al estado de oxidación de la muestra y no al alto contenido de cenizas.

Como se deduce de la Tabla 59, en 11 de las muestras tratadas (correspondientes al 52 %), el proceso de lavado causa variación en el número de subgrupo, de grupo, o ambos a la vez, por el aumento en porcentaje de dilatación o índice de hinchamiento. En 7 de los 21 carbones, el lavado no influye

en la clasificación internacional, permaneciendo el mismo código antes y después del lavado y solamente en 3 muestras se produce una modificación algo mayor, ya que el cambio en el porcentaje de materias volátiles produce variación en el número de clase.

Finalmente, teniendo en cuenta el relativamente alto índice de molienda de los carbones estudiados, se plantea la necesidad de efectuar estudios posteriores que complementen los ensayos de lavabilidad, tales como el análisis de flotación de finos, puesto que éstos pueden llegar a producirse en cantidades considerables dependiendo del método de minería utilizado.

9.4. FORMAS DE AZUFRE

La determinación de las formas de azufre, se realizó en 14 muestras seleccionadas por su alto contenido de azufre total y de cenizas.

Las proporciones relativas de azufre encontradas, varían mucho como se deduce de la Tabla 62, aunque en la forma de sulfato se presenta sólo en pequeñas cantidades para la mayoría de las muestras. El examen de los 14 carbones con azufre total entre 1.12 y 2.38 % muestra que del 36.6 al 72.3 % del azufre se presentan como azufre orgánico, y del 23.9 al 60.7 % como azufre pirrítico.

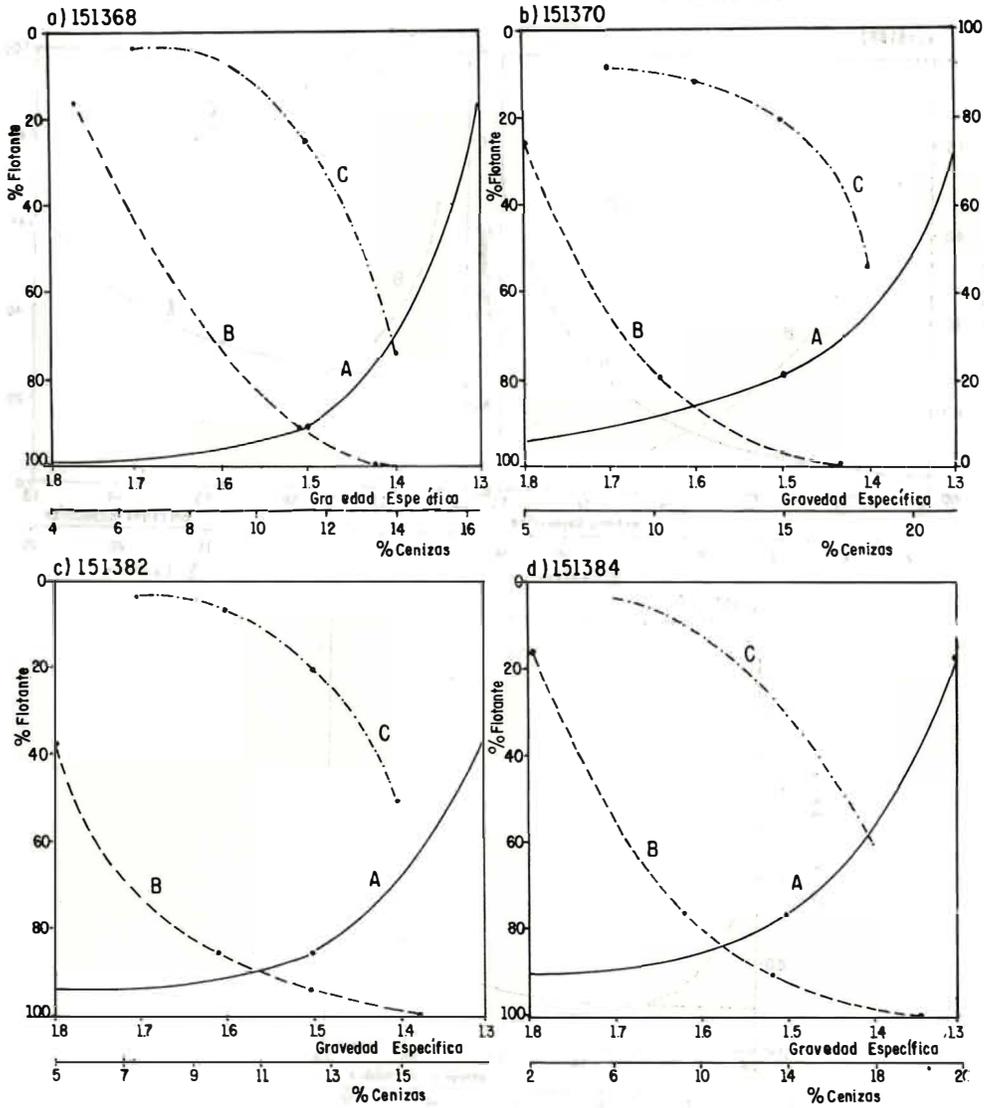
TAB. 61: Indices ± 0.10 de la gravedad específica de lavado presentados por carbones de la Zona Checua - Lenguazaque (datos en porcentaje).

BLOQUE I										
Grav. Espec.	151368	151370	151372	151382	NUMERO MUESTRAS DE INGEOMINAS					
					151384	151419	151422	151428	151430	151432
1.40	74	54	56	50	60	36	27	58	14	44
1.50	25	21	21	21	30	19	10	28	6	23
1.60	7	12	10	7	13	9	4	11	2	8
1.70	4	8	5	4	4	4	1	4	1	3

BLOQUE II				BLOQUE III				BLOQUE V			
Grav. Espec.	151379	151392	151407	1511358	NUMERO MUESTRAS DE INGEOMINAS						
					151359	151362	151423	151402	151409	151411	151412
1.40	37	30	15	28	28	27	13	62	47	42	47
1.50	18	12	10	14	11	8	8	29	21	20	22
1.60	13	5	5	8	4	2	5	11	9	7	6
1.70	11	2	1	5	1	1	3	5	5	2	3

TABI. 62: Resultados de la determinación de formas de azufre en algunas muestras de la Zona Checua - Lenguazaque.

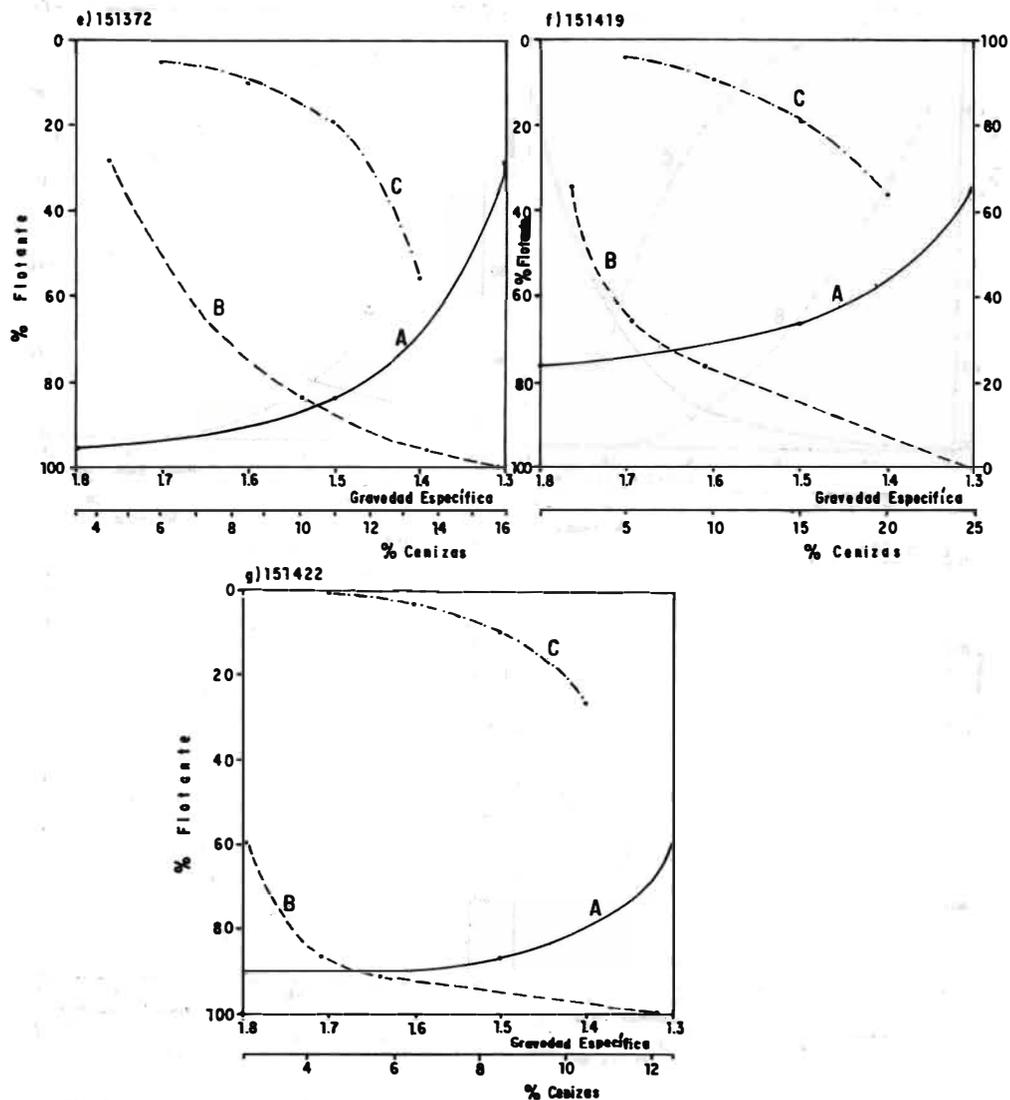
Muestra No. IGM	No. de Campo GBS	En base como se analizó			Proporciones relativas al Azufre total		
		Azufre Pirítico %	Azufre Sulfato %	Azufre Orgánico (por diferencia) %	S Pirítico %	S Sulfato %	S Orgánico %
151357	4	0.76	0.05	1.23	37.2	2.5	60.3
151358	5	0.56	0.16	1.02	32.2	9.2	58.6
151359	6	0.46	0.10	0.86	32.4	7.0	60.6
151362	9	0.33	0.35	0.64	25.0	26.5	48.5
151366	13	0.30	0.01	0.81	26.8	0.9	72.3
151367	14	0.75	0.04	0.85	45.7	2.5	51.8
151368	15	0.56	0.08	0.88	36.8	5.3	57.9
151370	17	1.16	0.04	0.88	55.8	1.9	42.3
151372	19	1.08	0.03	1.02	50.7	1.4	47.9
151379	26	0.37	0.06	0.75	31.4	5.1	63.5
151382	29	0.28	0.11	0.78	23.9	9.4	66.7
151409	56	1.42	0.06	0.86	60.7	2.6	36.7
151410	57	1.40	0.11	0.87	58.8	4.6	36.6
151411	58	0.74	0.07	0.81	45.7	4.3	50.0



Curvas : A.-Gravedad específico - rendimiento de flotante; B.- Cenizas - rendimiento de flotante; C.- Distribución de material en ± 0.1 gravedad específico.

FIG. 108: Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque I - Zona Checua - Lenguazaque.

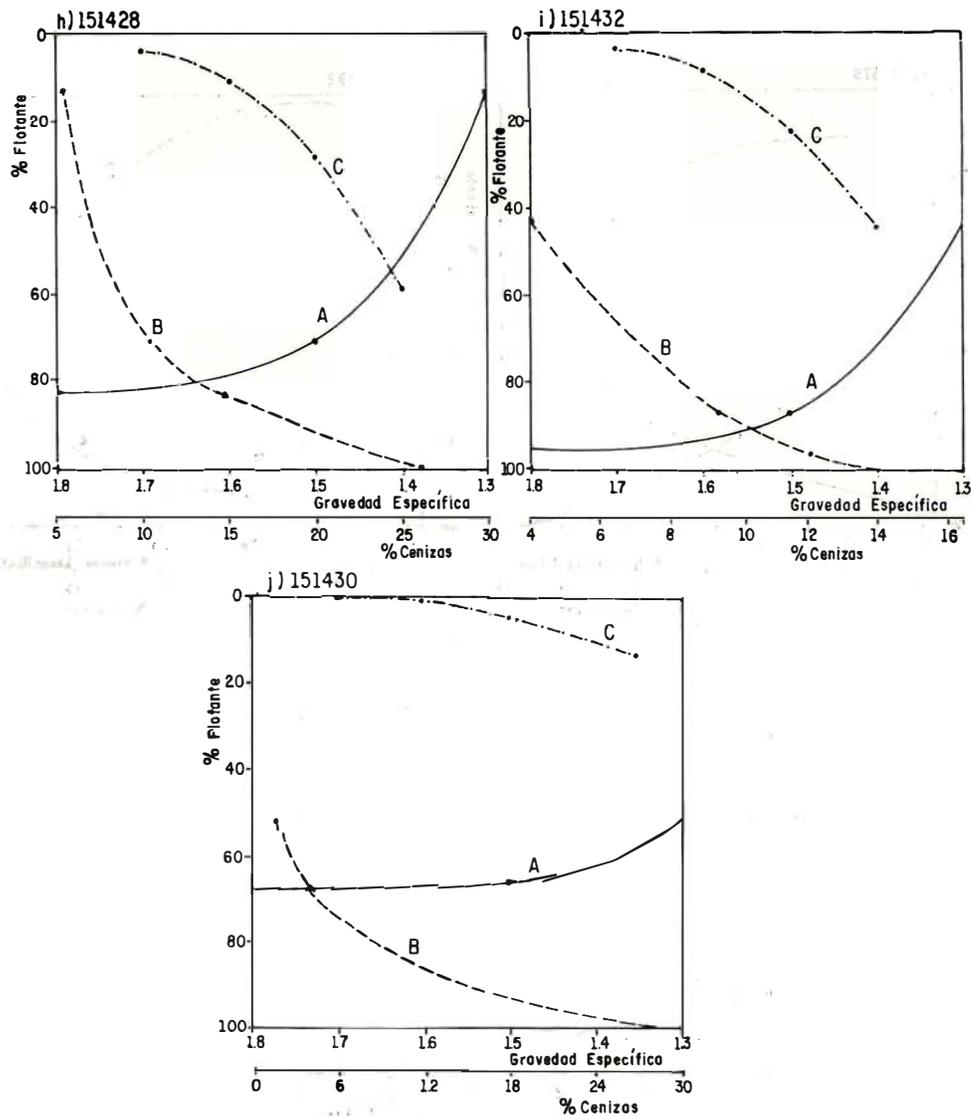
CURVAS DE LAVABILIDAD DE LAS MUESTRAS DEL BLOQUE I- ZONA CHECUA
LENGUAZAQUE



CURVAS: A. GRAVEDAD ESPECIFICA - RENDIMIENTO DE FLOTANTE; B. CENIZAS - RENDIMIENTO DE FLOTANTE; C. DISTRIBUCION DE MATERIAL EN ± 0.1 GRAVEDAD ESPECIFICA

FIG. 108: (Cont.)

CURVAS DE LAVABILIDAD DE LAS MUESTRAS DEL BLOQUE I - ZONA CHECUA - LENGUAZAQUE .



Curvas: A.-Gravedad específica - rendimiento de flotante; B.-Cenizas - rendimiento de flotante; C.-Distribución de material en ± 0.1 gravedad específica.

FIG. 108: (Cont.)

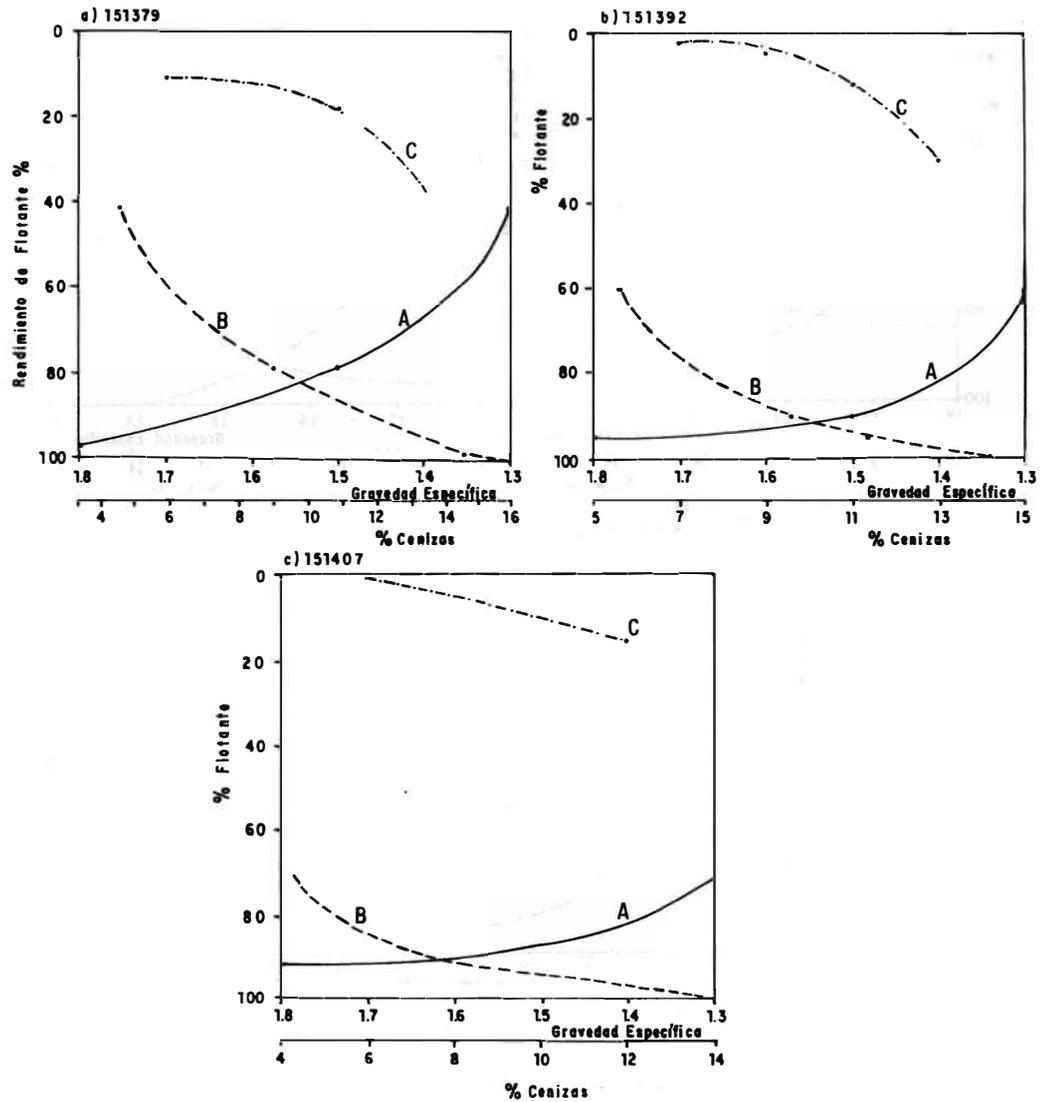


FIG. 109: Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque II - Zona Checua - Lenguazaque.

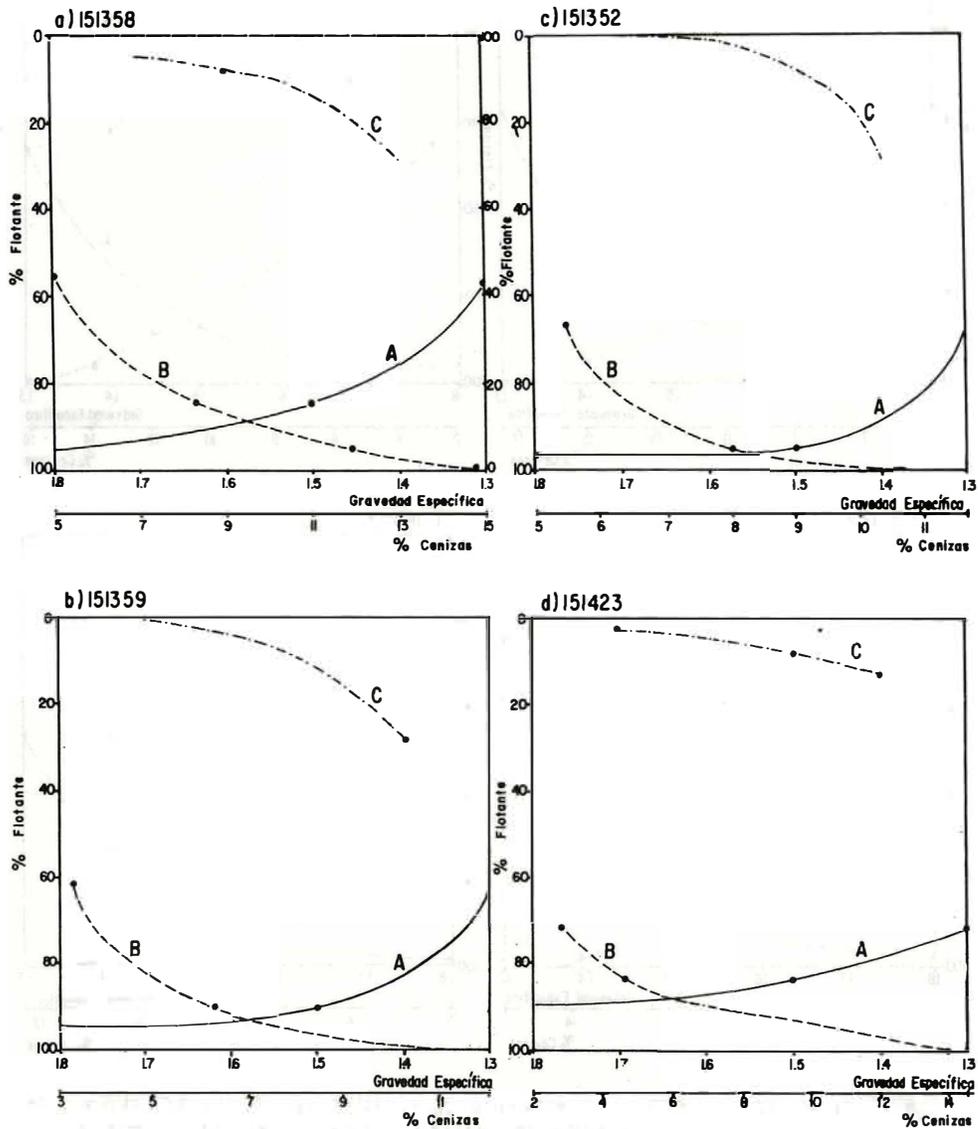
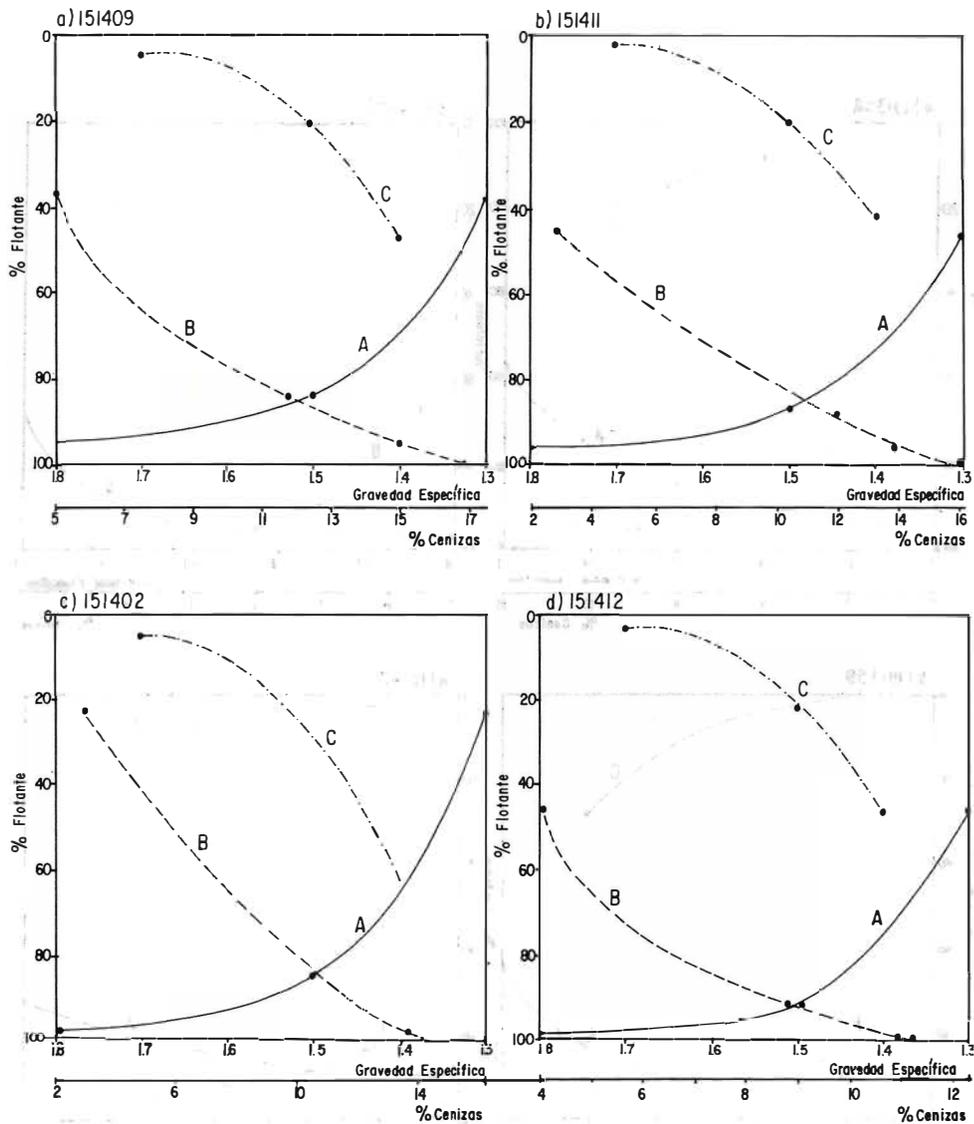


FIG. 110: Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque III - Zona Checua - Lenguaque.



CURVAS : A. GRAVEDAD ESPECIFICA - RENDIMIENTO DE FLOTANTE; B. CENIZAS- RENDIMIENTO DE FLOTANTE; C. DISTRIBUCION DE MATERIAL EN ± 0.1 GRAVEDAD ESPECIFICA.

FIG. 111: Curvas de lavabilidad de las muestras del bloque V - Zona Checua - Lenguazaque.

El alto valor de azufre sulfato (26.5 % del azufre total) presentado por la muestra 151362, indica que este carbón ha sufrido procesos de meteorización u oxidación, lo cual concuerda con el hecho de haberse muestreado en un frente abandonado. Como se indica en el capítulo anterior, el contenido de calcio en las cenizas es relativamente alto para esta muestra, por lo cual se considera que el sulfato se presenta como sulfato de calcio.

Aunque en menor proporción que la anterior, también presentan relativamente alto contenido de azufre sulfato y por consiguiente alguna oxidación, las muestras 151358, 151382 y 151359, ésta última proveniente de un frente minero actualmente inactivo.

Como se observa en la Tabla 59, en general no se obtiene una disminución del contenido de azufre mediante el lavado, lo cual se debe a que en la mayoría de los carbones analizados la mayor proporción de azufre corresponde a azufre orgánico. Los casos donde se observa una significativa reducción de azufre mediante lavado, corresponden a la presencia de 50 % o más del azufre en forma inorgánica (pirítico mas sulfato); resultado que indica además que la pirita está presente como partículas discritas y no finamente dispersada, ya que es fácilmente removida por lavado.

10. CONCLUSIONES

1. Se corrobora la imposibilidad de correlacionar los mantos de carbón (con los elementos de juicio el alcance en el presente estudio), por cuanto el número de mantos es variable aún dentro de cada bloque y nivel litoestratigráfico. Aunque se definen las columnas estratigráficas tipo para cada uno de los bloques, la variación en la cantidad de mantos explotables es gradual y transicional entre dos bloques adyacentes; la correlación se dificulta por no poseer datos de los llamados "boquerones" que están cubiertos por sedimentos de edad cuaternaria.
 2. Las muestras colectadas al norte de Guachetá, Bloque V, fueron correlacionadas con la columna estratigráfica tipo del Bloque I, y aunque presentan variaciones tanto en los espesores de los mantos de carbón, como en las series sedimentarias correspondientes a los niveles TKg2 y TKg3, la continuidad de las características de los carbones es apreciable.
 3. Los carbones estudiados presentan valores de humedad relativamente bajos y bien centralizados, y existe la tendencia a registrar valores ligeramente más altos de humedad a medida que se va hacia el sur en el sinclinal, esto es del Bloque V hacia el III. Los valores de humedad encontrados permiten prever que estos carbones no presenten problemas de manejo en centrales típicas de generación de vapor. La reducción del contenido de humedad tiene un efecto favorable sobre la cohesión del coque (Micum 10); bajo este punto de vista los tenores bajos de humedad en estos carbones, en líneas generales, serían ventajosos en el proceso de coquización.
 4. El contenido de cenizas de los carbones analizados, no presenta ninguna relación evidente con la ubicación de la muestra en un determinado bloque o nivel. Con algunas excepciones, presentan bajos valores de cenizas (67% de los carbones con cenizas inferiores al 10%), circunstancia bastante favorable para la utilización de estos carbones en los procesos de coquización y combustión y en la comercialización.
 5. El contenido de materia volátil presenta una evidente dependencia con la localización de la muestra; se puede generalizar este hecho, en una disminución progresiva del porcentaje de materia volátil desde el Bloque III hacia el V, y un mayor contenido de volátiles para los carbones del nivel TKg3 que para los del TKg2.
- Se detecta también, la relación del porcentaje de materia volátil con la profundidad relativa, obtenida de la columna estratigráfica, con un promedio para el flanco occidental de 2.5% de disminución en volátiles

por cada 100 m de aumento en la profundidad.

6. El poder calorífico (base seca libre de cenizas) presenta muy leves variaciones de un bloque a otro, y a pesar de que se detecta el aumento del poder calorífico con el rango en la zona estudiada, este no es muy significativo. Se puede generalizar que para el flanco occidental, este parámetro tiende a ser una constante, si se elimina la influencia de la humedad y de las cenizas.

7. Los carbones estudiados tienen alto contenido de carbono, 87.91% en promedio, y se enriquecen en este elemento de forma progresiva y uniforme, mientras que el hidrógeno disminuye a medida que se avanza hacia el norte del sinclinal. El oxígeno también decrece a mayor rango del carbón. El alto contenido de oxígeno en relación al rango de algunas muestras es indicativo de su meteorización. Sin embargo, se presentan también carbones, en los cuales la alteración no se revela por el valor del oxígeno.

Los carbones presentan un contenido de nitrógeno entre 1.63 y 2.12 %, independientemente de su ubicación según el bloque y nivel estratigráfico, concluyéndose que no depende del rango.

8. Sólo un 26 % de las muestras estudiadas presentan niveles relativamente altos de azufre (mayor de 1%), hecho bastante favorable en la utilización y comercialización del carbón.

9. Una de las características de los carbones analizados, que puede ser desfavorable, es su alto índice de molienda Hardgrove, en especial para los carbones de los bloques V y I. Este resultado implica gran facilidad para la producción de finos, lo cual es inconveniente en varias operaciones tales como manejo, transporte, almacenamiento, etc. Pero puede causar a la vez un ahorro de energía consumida en los molinos, en el caso de requerirse carbón pulverizado en el proceso industrial.

10. La gravedad específica, especialmente la aparente, se utiliza en el cálculo de reservas; a este respecto, para los carbones del flanco occidental cabe asumir un valor de 1.31.

11. Para la mayoría de variables se puede establecer una correlación con algún otro parámetro, obteniéndose en algunos casos relaciones lineales muy estrechas. Esto permite efectuar un buen control de análisis, permitiendo detectar datos erróneos, racionalizar chequeos o duplicaciones de análisis y, en el caso de confirmación de valores, detectar anomalías en la historia del carbón, como modificaciones locales de rango, oxidación, etc.

12. En el caso de correlación estrecha de dos variables, el establecimiento de la ecuación de relación interparamétrica permite, con base en algunos valores, hacer extrapolaciones o predicciones con alguna aproximación, determinando otros parámetros. Así, el conocimiento del contenido de carbono de una muestra de la zona, permite calcular con buena aproximación el poder calorífico que tendría dicha muestra.

13. De las variables en base como se analizó, las correlaciones más altas encontradas son: poder calorífico - carbono, carbono cenizas, gravedad específica verdadera - cenizas, temperaturas de ablandamiento, máxima contracción y máxima dilatación con materias volátiles, dilatación total materias volátiles, humedad de equilibrio - humedad residual e índice de hinchamiento - humedad residual. En base seca: poder calorífico - cenizas, y en base seca libre de cenizas: poder calorífico - carbono, - materia volátil, índice de molienda Hardgrove - materia volátil, poder calorífico - materia volátil, hidrógeno - carbono, hidrógeno - materia volátil y carbono - carbono fijo.

14. Los carbones estudiados del flanco occidental del sinclinal se clasifican como bituminosos bajos, medios y altos volátiles A dependiendo de su ubicación, y pertenecen al grupo estadístico V de la Clasi-

ficación Internacional, siendo en su mayoría carbones denominados coquizantes de primera clase.

15. Los carbones analizados poseen alto índice de hinchamiento, con contadas excepciones, atribuidas éstas al estado de alteración de algunas muestras.

El índice de hinchamiento no es útil para evaluar las propiedades coquizantes; así, se observa particularmente con los carbones del manto la Cisquera que, a pesar de poseer alto índice de hinchamiento, dan dilatación negativa y aún no expanden en el ensayo al dilatómetro.

16. De todos los parámetros estudiados, el porcentaje de dilatación es el que varía más ampliamente, econcontrándose además que cambia irregularmente en el sentido norte-sur del sinclinal, pero que disminuye con la profundidad relativa (estratigráfica).

17. El análisis químico y en especial el ensayo dilatométrico, permite detectar las oxidaciones de la muestra reflejándose en disminución progresiva del porcentaje de dilatación, aumento del oxígeno elemental y aumento en el contenido de azufre sulfato.

18. Exceptuando los carbones con dilatación negativa, los carbones estudiados superan el límite inferior de capacidad aglomerante para producir coques de resistencia aceptable, pero es factible que los del nivel TKg3 coquizados sólo presenten problemas debido a su excesiva dilatación; particularmente los del Bloque III de este nivel, con alto contenido de materias volátiles, pueden producir coques fisurados, por lo cual el uso más adecuado de éstos sería en mezclas con carbones poco hinchables o de bajos volátiles.

19. El estudio corrobora que la dilatación es máxima para un contenido de materias volátiles entre 25 y 30 % (b.c.s.a.), como también que las tres temperaturas características del ensayo dilatométrico, aumentan con el rango de los carbones. Así, los del

norte del sinclinal presentan temperaturas más altas que los del sur, e igualmente, los del nivel TKg2 mayores valores que los del TKg3.

20. En el flanco occidental del sinclinal, el grado de carbonificación de los Carbones varía de acuerdo al bloque y nivel estratigráfico a los que pertenecen. El rango crece desde el Bloque III hacia el V, y es mayor para el nivel TKg2 que para el TKg3.

El aumento de rango se evidencia principalmente por los siguientes hechos:

disminución progresiva del porcentaje de materia volátil.

aumento del contenido de carbono fijo.

aumento del poder calorífico.

aumento del contenido de carbono elemental.

disminución del porcentaje de hidrógeno.

disminución del contenido de oxígeno.

disminución del contenido de humedad.

aumento de las temperaturas de ablandamiento, máxima contracción y máxima dilatación.

21. De los 21 carbones lavados (con cenizas de 11 % o más), 18 tienen buenas características de lavado y los tres restantes (151368, 151409 y 151411) presentan una relativa dificultad de lavado, lo cual indica que en éstos, las impurezas minerales se encuentran finamente dispersadas o muy ligadas a la materia orgánica.

22. En el caso de realizar el lavado del carbón en medios densos, no se considera útil la determinación del índice ± 0.10 de gravedad específica, pues contrario a

la dificultad de lavado de él, deducida para la mayoría de los carbones tratados, las impurezas presentes en general se separan fácilmente.

23. En general, no se logra disminuir el azufre mediante lavado, en concordancia con el hecho de que en la mayoría de los carbones estudiados, predomina el azufre orgánico. Los casos donde el azufre es reducido con el lavado, corresponden a los carbones con azufre pirítico mayor de 45 % respecto al total, resultado que demuestra que la pirita se presenta en partículas discretas y no finamente dispersa.

24. En las cenizas de los carbones de la zona se encuentran principalmente compuestos de silicio, aluminio, hierro y calcio y menores cantidades de compuestos de magnesio, sodio, potasio y titanio. La cantidad presente de éstos varía en rangos amplios y no sigue un patrón regular, concluyéndose la heterogeneidad del aporte mineral en el depósito, dependiendo de la localización del manto muestreado en cada caso.

25. Exceptuando la muestra 151410, que tiene una composición de cenizas diferente a las demás, los contenidos de elementos mayores (expresados como óxidos) para la zona son: Fe_2O_3 menor de 14.73 %, SO_3 menor de 1.22 %, CaO menor de 5.46 %, Na_2O menor de 1.39 %, K_2O menor de 2.62 %, MgO menor de 1.01 %, P_2O_5 menor de 3.27 %, y TiO_2 menor de 1.81 %.

26. De las 83 muestras de cenizas analizadas, 75 se clasifican como bituminosas y las 8 restantes como ligníticas. Estas últimas no están localizadas en un sólo bloque o nivel, sino que se encuentran irregularmente distribuidas, de lo cual se concluye que su carácter lignítico es debido a una causa localizada, como es la presencia de rellenos minerales o concreciones en el manto muestreado.

27. Del análisis de elementos mayores en cenizas se llega a algunas conclusiones sobre la mineralogía de la zona: la alta relación silicio/aluminio y la falta de correlación

positiva de éstos con los demás elementos, indica la presencia de cantidades apreciables de cuarzo y alguna cantidad de Al_2O_3 (diaspora).

Por otra parte, las correlaciones positivas de los demás elementos entre sí, indican la posible presencia de ankerita, pirita, biotita y apatita.

28. En cuanto a los factores de encostramiento y de deposición (fouling y slagging), se encuentra que para todas las muestras de cenizas bituminosas, estos factores son bajos, a excepción de la 151410, la cual presenta factores medios.

En las cenizas ligníticas dichos factores son también bajos, exceptuando las muestras 151395 y 151377, que tienen factor de slagging medio.

Por lo tanto los carbones de esta zona no presentarán problemas de formación masiva de escoria, ni de depósitos obstructivos, cuando se sometan a proceso de quemado.

29. Entre los parámetros calculados con propósitos de caracterizar las propiedades de fusibilidad y viscosidad de la escoria se tienen:

El contenido de bases que varía entre 1.38 y 31.18, y la relación base/ácido entre 0.01 y 0.49. Esta última con mayor frecuencia de valores entre 0.01 y 0.06; estos son valores bajos, que permiten predecir temperaturas de fusión altas. La relación silicio/aluminio varía entre 1.66 y 6.90, con media de 2.46

30. Respecto a los ensayos de fusibilidad se encuentra que las temperaturas de fusión de las cenizas son altas. Así, la temperatura de deformación inicial tiene mayor frecuencia entre 1450 y 1500° C, concluyéndose que los carbones no presentarán problemas de acumulación de escoria parcialmente fundida, y pueden emplearse en un sistema de remoción de cenizas sólidas.

31. Las correlaciones entre la composición de las cenizas y la temperatura de deformación inicial (ITR), comprueban el carácter refractario del silicio y el aluminio, y la acción fundente del hierro y el calcio, que se tiene para muestras de este rango de composición.
 32. En cuanto a la predicción de las propiedades de fusibilidad se encuentra: correlación negativa para ITR - bases, y la correspondiente correlación positiva ITR - ácidos con coeficiente de 0.724, correlación negativa con relación base/ácido y positiva con la relación sílica, siendo ésta última la más alta del estudio de cenizas para la zona, con un valor de 0.738.
 33. Los bajos contenidos de SO_3 , P_2O_5 y álcalis en las cenizas de carbones analizados, hacen posible la utilización de éstas en hornos de cemento.
 34. La mayoría de los carbones estudiados son clasificados como buenos coquizantes, ya que están en el grado de carbonificación apropiado, tienen bajos contenidos de humedad, cenizas y azufre; en general, los que presentan porcentaje relativamente alto de materia mineral, poseen buenas características de lavabilidad. Las propiedades plásticas de estos carbones, en especial la dilatometría, permiten predecir buenas calidades de coques para algunos, y posibilidad de mezclas para otros. Además, los contenidos de SO_3 y P_2O_5 en las cenizas, indican que los coques obtenidos, cumplirían con los requisitos, en cuanto a estos factores.
2. Teniendo en cuenta que en el sector comprendido entre la localidad de Guachetá (Cundinamarca) y Samacá (Boyacá), se halla la transición entre las zonas carboníferas de Checua - Lenguazaque y Samacá - Tunja, se hace indispensable adelantar una prospección geológica detallada que deberá ser complementada con la medición de columnas estratigráficas y toma de muestras, con el fin de correlacionar estas dos zonas carboníferas, que hasta ahora se han considerado independientes.
 3. Complementar el estudio de la zona Checua - Lenguazaque, mediante muestreo y análisis de carbones de los bloques III, IV y del flanco oriental del sinclinal.
 4. Efectuar estudios detallados de lavabilidad, empleando amplia escala de densidades y diferentes granulometrías, para establecer pormenorizadamente las características de beneficio de los carbones de área; deben incluir estudio de depuración de finos (flotación, aglomeración selectiva), ya que la naturaleza blanda y degradable de estos carbones implica una apreciable producción de finos.
 5. Efectuar ensayos de coquización con estos carbones con optimización de mezclas de ellos para tal fin; comparar las características del carbón y su comportamiento bajo calentamiento a nivel laboratorio, con el coque obtenido industrialmente, para sacar conclusiones que permitan predecir calidad del coque.

11. RECOMENDACIONES

1. Aunque los carbones estudiados poseen buenas características térmicas, se recomienda como óptima utilización su coquización, dadas las excelentes propiedades coquizantes de la mayoría de ellos. El hecho que algunos presenten dilatación e hinchamiento excesivos, permite valorizar carbones con pocas propiedades plásticas de la misma zona o de otra, para la obtención de mezclas coquizables que den coque de buena calidad.
- Determinar la aplicabilidad de los métodos existentes para predecir la calidad del coque basados en la petrografía y las propiedades plásticas.
6. Con base en el estudio correlativo efectuado, determinar el grado de precisión con el cual pueden predecirse las diversas variables, y corroborar la aplicabilidad de las ecuaciones teóricas para paráme-

tros analíticos, en especial poder calorífico, para determinar la más adecuada a estos carbones o deducir una de mayor valor predictivo.

7. Complementar la caracterización realizada a los carbones, con los correspondientes estudios petrográficos.
8. Se recomienda para futuros trabajos y para complementar el presente, procurar el análisis mineralógico directo de las cenizas, el cual podría efectuarse por técnicas de Rayos X, infrarrojo o análisis térmico diferencial. Esto con el objeto de tener información comprobada de los minerales presentes, pudiéndose llegar a conclusiones sobre la influencia de cada uno en las propiedades de las cenizas, y sobre los procesos de formación del depósito.
9. Efectuar el análisis de elementos traza (As, Sb, B, V, Cd, Cu, Zn, Pb, Ba, Ga, etc.), en las muestras de esta zona y en las que se estudien en el futuro con el objeto de conocer si existen elementos de interés económico o que pueden causar problemas de contaminación, y en general, complementar la caracterización de nuestros carbones desde este punto de vista.
10. Estudiar la composición de las cenizas tal como se obtienen luego de la utilización industrial del carbón, caracterizando así por su composición este desecho, del cual ya se tienen acumuladas millones de toneladas en el país.

Por otra parte, recopilar la información disponible sobre características de calidad que deben cumplir las cenizas del carbón para las diversas formas de aprovechamiento, enmarcando así las cenizas de cada zona del país, según el aprovechamiento adecuado.

12. BIBLIOGRAFIA

ADARO, 1978.- *Estudio de prefactibilidad para la explotación de carbones coquizables en los Bloques I y II, borde occidental del Sinclinal de Checua - Lenguazaque*. Empresa Nacional ADARO de Investigación Minera.

Madrid, España.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 1982.- *Part. 26. pp. 189-458.*

BARBOSA, C.A., 1971.- *Empleo de la ceniza como subproducto del carbón*. Memorias del Primer Simposio sobre Importancia del carbón para el Desarrollo de Colombia. Sochagota. p.73.

BENEDICT, L.G., WILLIAM, F., BERRY, 1966.- *Further applications of coal petrography*. in: Given, P.H. Coal Science. p.577.

BERKOWITZ, N., 1950.- *Fuel*. 29, 138.

BLANCO, G., ROMERO, E., URIBE, C., 1977.- *Clasificación internacional de los carbones de Checua - Lenguazaque*. Inf. 1726. Ingeominas, Bogotá.

BONE, W., HIMUS, G.W., 1936.- *Coal Its constitution and Uses*. Longmans Green Co. London.

BUREAU OF MINES, 1967.- *Methods of analyzing and testing coal and coke*. Boletín 638.

CARBOCOL, 1983.- *Censo Nacional de Minas*. División de investigaciones económicas y estadística. Bogotá.

CEDEÑO, C.J., ESPINOSA, A. y LESMES, L.E., 1979.- *Contribución al estudio químico de las cenizas del carbón en Colombia*. Ingeominas, Bogotá.

CERCHAR PUBLICATION No. 1585.- *Méthodes pratiques de controle dans la préparation mécanique des charbons*. Centre D' études et Recherches des charbonnages de France. París. p.14-15.

CIASCHI, R., 1979.- *Parámetros de calidad del carbón y del coque en la industria siderúrgica*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. p. 177.

- COAL PROCESSING CONSULTANTS LTD, 1980.- *The effect of physical and chemical properties of coals on their acceptability for steam generation*. 163: 42 -67.
- DADSWELL and DEANSFIELD, 1957.- *Paper 13*. Second conference on pulverized fuel. Nov. in: Coal Processing Consultants Ltda. 1980. p. 63.
- DE PORTA. J., 1974.- *Lexique Internationale stratigraphique*. Amerique Latine, Vol. V Fase 4b: 275 -283. Centre National de la Recherche Scientifique. París.
- DURAN, R., MOJICA, P., ALVARADO, B., LOBO-GUERRERO, A., 1981.- *Evaluación de reservas de carbón en siete zonas carboníferas de Colombia para el estudio nacional de energía*. Ingeominas. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, No. 6: 1-39, Bogotá.
- ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (E.C.E.), 1983.- *Coal committee. Fourth adhoc meeting on the preparation of a new E.C.E. Classification of coals*. Geneva.
- ESPINAL, et. al. 1964.- *Mapa ecológico de Colombia*, I.G.A.C. Bogotá.
- FRANCIS, W., 1969.- *Los combustibles y su tecnología*. Edic. Urmo. España. p. 100, 107, 129, 165, 166.
1954. -*Coal. Its formation and composition*. Edward Arnold Ltd. London. p. 312, 346.
- GIBSON, J. 1971.- *Prediction of coke quality*. The coke oven manager's Year -Book. p. 182 a 205.
- GIVEN, P. H. and YARZAB, R. F. 1975.- *Problems and solutions in the use of coal analyses*. Coal Research section The Pennsylvania state University. p. 20-21.
1966. *Coal Science*. American chemical society. Washington, D.C.
- HERRERA, B., MATEUS, E. 1977.- *Censo minero del Sinclinal Checua - Lenguazaque (Cundinamarca)*. Inf. 1728. Ingeominas, Bogotá.
- HETTNER, A., 1892.- *La Cordillera de Bogotá*. Resultados de viajes y estudios, versión en español de Guhl, E. (diciembre 1966). Banco de la República. Bogotá.
- HUBACH, E. 1957.- *Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores*. Min. de Min. y Petr. Bol. Geol. , Vol. (2). Bogotá.
- HUMPHREYS, K.K. and LAWRENCE, W.F. 1967.- *Getting the most out of your proximate analysis, Part. I, Coal preparation*. Vol. 3 (1): 12-18.
- 1967.- *Getting the most out of your proximate analysis. Conclusion coal preparation*. Vol. 3. (2): 69 - 71.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION (ISO).- *Hard coal: Audibert Arnou dilatometer test*. ISO standard 349, 1975 E.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (ICONTEC), 1981.- *Norma 1675. Coque metalúrgico*.
- JENKINS. R.G., WALKER, P.L. 1978.- *Analysis of mineral matter in coal*. in: Karr, C., Analytical methods for coal and coal product. Vol. II. Academic Press Inc. London. p. 269.
- KARR, C., 1978.- *Analytical methods for coal and coal product*. Academic. Press. London. V.I.
- KREULEN, D.J.W., 1952.- *Elementos de química del carbón*. Aguilar, S.A. Ed. Madrid. p. 169-173.

- LAVERDE, F., 1979.- *Espesor, estratigrafía y facies de la Formación Guaduas en algunos sitios del Cuadrángulo K-11*. Tesis de grado, Universidad Nacional. Ingeominas. Bogotá.
- LOISON, R., FOCH, P., BOYER, A., 1970.- *Le coke principes de la fabrication Recherche de la qualité*. Ed. Dunod. París. p. 41, 91, 113.
- LOWRY, H.H., 1963.- *Chemistry of coal utilization. Supplementary Volume*. John Wiley & Sons Inc. New York p. 147, 148, 171, 173, 175, 310, 315, 326, 496.
- 1945. *Chemistry of coal utilization* John Wiley Sons. Inc. London. Vol I. p. 193, 436, 444, 586.
- MARTINEZ, J., 1973.- *Lavado de carbones*. IV Congreso Nacional de Minería. Paipa, Colombia.
- McBRIDE, R.N., 1981.- *Recopilación sobre la utilización del carbón térmico División de Desarrollo y Tecnología*. Shell Coal International in: Shell Coal Colombia. El carbón: su presente y futuro. p. 6-7.
- McLAUGHLIN, D., ARCE, M., 1971.- *Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta*. Min. de Min. y Petr. Bol. Geol. Vol. XIX, No. 1, Bogotá.
- 1969.- *Mapa geológico del Cuadrángulo K-11, escala 1:100.000*. Ingeominas. Bogotá.
- MOLINA, E., 1963.- *Cretáceo carbonífero del Norte de Bogotá*. Min. de Min. y Petr. Bol. Geol. Bol. (12): 1-3. Bogotá.
- NATIONAL COAL BOARD, 1964.- *The coal classification system used by the national coal Board*.
- NIGRINIS, R., HERRERA, B. BLANCO, G., 1975.- *Cuenca carbonifera de Checua - Lenguazaque*. Inf. 1671. Ingeominas, Bogotá.
- PEREZ, F., URIBE, C. y VALDERRAMA, G., 1982.- *Análisis último elemental del carbón*. Ingeominas, Bogotá. 88 p.
- PHILLIPS, P.J., 1978.- *Coal preparation for combustion and conversion*. Electric Power Research Institute. Gibbs & Hill, Inc. New York. pp. 2-1 a 2-6, 2-37.
- REES, O.W., 1966.- *Chemistry, uses and limitations of coal analyses*. Illinois State Geological Survey. Report of investigations 220. p. 17.
- REINO, G. y ROJAS., 1981. *Petrografía de carbones de la parte septentrional de la Cuenca Checua - Lenguazaque*. Trabajo final. Universidad Nacional. Dpto. de Geociencias. Bogotá.
- SCHOPF, J.M. and LONG, W.E., 1966.- *Coal metamorphism and igneous associations in Antarctica in: Given, P. Coal science American Chemical society. Washington, D.C. p.193-194*.
- SHAPIRO, L., 1975.- *Rapid analysis of silicate, carbonate and phosphate rocks*. Revised edition. United States Geological Survey Bulletin 1401. Washington. p. 43.
- SHELL COAL COLOMBIA, 1981.- *El carbón: su presente y futuro*. Reseña preparada para CARBOCOL S.A. 27 p.
- SPIEGEL, R. MURRAY., 1970.- *Teoría y problemas de estadística*. Compendios Schaum. Mc.Graw-Hill Co. p 27-99, 217 - 269.
- STACH, et. al., 1982.- *Textbook of coal petrology*. Gebrüder Borntraeger. Berlin. p. 41.

- SUBRAMANIAM, T.K., 1978.- *Coal Age operating Handbook of coal preparation*. McGraw-Hill, Inc. Vol. 3: 216-217. New York.
- THE BRITISH CARBONIZATION RESEARCH ASSOCIATION (BCRA), 1976.- *Recomendations for the dilatometric examination of coal*. Special publication 17. 15 p.
- TEICHMULLER, M. and TEICHMULLER, R., 1966.- *Geological causes of coalification*. in: Given, P. Coal science. American Chemical Society Washington, D.C. F.R. Gould, editor. pp. 133-137.
- UJUETA, G., 1961.- *Geología al Noreste de Bogotá*. Bol. Geol. Ser. Geol. Nal., Ingeominas. Vol. IX (1-3): 23-46. Bogotá.
- URIBE, C., 1982.- *Dilatometer studies of coals in relation to their rank and type variation*. Tesis de grado M.Sc. Newcastle Upon Tyne. P. 33. Inglaterra.
- VAN DER HAMMEN, T., 1957.- *Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental)*. Min. de Min. y Petr. Ser. Geol. Nal., Bol. 5. No. 2. Bogotá.
- VAN RREVELEN, O. W., 1961.- *Coal*. Elsevier publishing company. Amsterdam. p. 33, 270.
- OCINA, N. I., TODOR, D. N., 1978.- *Thermal analysis of coal and coal ashes*. in: Analytical methods for coal and coal products. Academic Press Inc. Vol. II: p. 619. London.
- WINEGARTNER, E. C., 1976.- *Understanding coal Ash Quality parameters*. AIME Transactions, Vol. 260:67-70.
- 1974.- *Coal Fouling and Slagging parameters*. A.S.M.E. Book No. 11-86 p. 17-18. New York.

APENDICE 1

FORMULAS ESTADISTICAS

NUMERO DE DATOS:

$$n$$

MEDIA ARITMETICA:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

VARIANZA: $S^2 =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot \bar{X}^2}{n - 1}$$

DESVIACION ESTANDAR:

$$S_x = \sqrt{S^2}$$

COEFICIENTE DE VARIACION:

$$V = \frac{S_x}{\bar{X}} \cdot 100$$

MOMENTOS

1o. MOMENTO:

$$M1 = \frac{\sum X}{n} = \text{MEDIA}$$

2o. MOMENTO:

$$M2 = \frac{\sum X_i^2}{n} - n \cdot \bar{X}^2$$

3o. MOMENTO:

$$M3 = \frac{\sum X^3}{n} - \frac{3 \cdot \bar{X} \cdot \sum X^2}{n} + 2 \cdot (\bar{X})^3$$

4o. MOMENTO:

$$M4 = \frac{\sum X^4}{n} - \frac{4 \cdot \bar{X} \cdot \sum X^3}{n} + \frac{6 \cdot \sum X^2 \cdot (\bar{X})^2}{n} - 3 \cdot (\bar{X})^4$$

COEFICIENTE DE SESGO:

$$\gamma_1 = \frac{M3}{(M2)^{3/2}}$$

COEFICIENTE DE CURTOSIS:

$$\gamma_2 = \frac{M4}{(M2)^2}$$

REGRESION LINEAL. MINIMOS CUADRADOS

EC. DE LA RECTA:

$$Y = AX + B$$

PENDIENTE:

$$A = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

INTERCEPTO:

$$B = \frac{\sum Y - A \sum X}{n} = \frac{(\sum Y) - (\sum X) \cdot (\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

COVARIANZA:

$$Cv = \frac{\sum XY - (\sum X)(\sum Y) / n}{n - 1}$$

COEFICIENTE DE CORRELACION:

$$r = \frac{Cv}{(S_x)(S_y)} \quad \text{ó}$$

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$