

Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Geología, Minas y Geofísica
Departamento de Geología

**Caracterización geoquímica de muestras de pozos exploratorios
en el aluvión de la cuenca de Barquisimeto- Cabudare, estado
Lara**

Trabajo Especial de Grado presentado por los Brs.

SOLÓRZANO Andrés, C.I: 17.571.825

VARGUILLAS Pedro C.I: 16.098.529

Para optar el Título de Ingeniero Geólogo

Tutor Académico:
Prof. URBANI Franco

SOLÓRZANO, Andrés; VARGUILLAS, Pedro

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE MUESTRAS DE POZOS
EXPLORATORIOS EN EL ALUVIÓN DE LA CUENCA DE BARQUISIMETO-
CABUDARE, ESTADO LARA**

Tutor académico e industrial: Prof. Franco Urbani. Tesis. Caracas, U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de
Geología. Año 2008.

Palabras clave: fluorescencia de rayos X, componentes mayoritarios, estadística multivariante, espectrometría de rayos gamma, cuenca de tracción.

Resumen: Se realizó una caracterización química y radiométrica, por medio de las técnicas fluorescencia de rayos X, espectrometría de rayos gamma y color Munsel a los sedimentos aluviales de la cuenca de Barquisimeto – Cabudare, utilizando muestras de pozos exploratorios ubicados en la zona occidental de la ciudad de Barquisimeto y en la parte occidental de la ciudad de Cabudare, estado Lara.

Un total de 391 muestras fueron preparadas y analizadas, siendo 359 muestras provenientes de 2 pozos geofísicos y 32 muestras tipo SPT. El estudio químico consistió en la determinación de las concentraciones de los componentes mayoritarios (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O en porcentaje) además de las ppm del V. El estudio de isótopos radiactivos determinó la radioactividad natural presente mediante la detección de las siguientes ventanas F1, ^{214}Bi , ^{212}Bi , F2, ^{214}Bi , F3, ^{40}K , F4, ^{214}Bi , F5, ^{208}Tl .

Los resultados químicos y radiométricos obtenidos mediante los métodos o técnicas mencionados anteriormente, se analizaron estadística y gráficamente para caracterizar los sedimentos y definir unidades, empleando el método del análisis de agrupaciones y reafirmados con el análisis de funciones discriminantes. A través de la elaboración de perfiles de distribución se definieron cuatro unidades químicas-radiométricas para la ciudad de Barquisimeto y cuatro para el pozo de Cabudare, estas unidades se lograron correlacionar con unidades geológicas existentes en la literatura.

Se interpreta que la fuente de sedimentos es diferente en los pozos estudiados. Siendo hacia la ciudad de Barquisimeto principalmente silíceo y hacia la ciudad de Cabudare más carbonático-arcilloso.

Hacia el pozo de Barquisimeto, las unidades químicas-radiométricas definidas se lograron correlacionar con los sedimentos cuaternarios Q_1 , Q_2 y Q_3 , propuestos por GIRALDO (1985). Se encontró un espesor sedimentario cuaternario de 93 m con una fuente sedimentaria principalmente asociada a las formaciones Barquisimeto, Moran y Matatere. Además se infiere que el basamento rocoso está compuesto en el pozo perforado por la Formación Bobare.

Las unidades químico-radiométricas definidas en Cabudare se lograron correlacionar con las formaciones cuaternarias Q_1 , Q_2 , Q_3 , y con sedimentos pliocenos pertenecientes a la Formación Guamacire (BUSHMAN 1965), donde hacia la base de esta unidad en el intervalo de 220 a 235 m de profundidad se observó la presencia de sedimentos arcillosos asociados a un posible ambiente lacustre originado durante el inicio de la apertura de la Cuenca de Tracción de Cabudare hacia el Plioceno (AUDEMARD & GIRALDO 1997). El espesor sedimentario total es 285 m, siendo las principales fuentes sedimentarias el Esquisto de Mamey y Aroa.

Finalmente mediante la comparación de las unidades geológicas interpretadas mediante las unidades químico-radiométricas generadas, se observó que existieron diversos periodos de actividad tectónica en la Cuenca de Tracción de Cabudare, siendo interpretado un período de gran subsidencia durante el Plioceno (depositación de la Formación Guamacire), uno de menor actividad hace 0,95 Ma (depositación de Q_3), con una nueva reactivación hace 0,4 Ma (depositación de Q_2), estando en la actualidad en una relativa “calma”.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Ubicación.....	2
1.5. Agradecimientos.....	6
2. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	9
2.1. Marco global.....	9
2.2. Surco de Barquisimeto.....	10
2.3. El complejo Tectono-Sedimentario de Lara.....	11
2.4. Unidades geológicas.....	15
2.5. Ambientes sedimentarios.....	31
2.6. Falla de Boconó.....	36
2.7. Cuenca de Tracción de Cabudare.....	40
3. BASES TEÓRICAS.....	43
3.1. Espectrometría rayos gamma.....	43
3.2. Fluorescencia de rayos X.....	44
3.3. Color Munsell.....	45
3.4. Caracterización geoquímica.....	45
3.5. Geoestadística.....	47
4. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	50
4.1. Fase de preparación de muestras.....	50
4.2. Fase de laboratorio.....	51
4.2.1. Espectrometría rayos gamma multicanal.....	51
4.2.2. Fluorescencia de rayos X.....	51
4.2.3. Color Munsell.....	51
4.3. Fase de procesamiento de datos.....	51
4.4. Definición de unidades.....	52
5. RESULTADOS.....	54

6. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	62
6.1. Estadística univariante.....	62
6.2. Estadística multivariante.....	64
6.2.1. Procesamiento de datos en pozo 1.....	65
6.2.2. Procesamiento de datos en pozo 3.....	72
6.3. Comparación entre pozos 1 y 3 (Barquisimeto).....	80
6.4. Procesamiento de datos en pozo 6.....	87
7. DISCUSIÓN E INTERPRETACIONES GENERALES.....	95
7.1. Comparación entre pozos.....	95
7.2. Definición y características de Unidades.....	97
7.2.1. Unidades definidas en “Barquisimeto”	97
7.2.2. Unidades definidas en “Cabudare”.....	108
7.3. Ambientes sedimentarios y ciclos sedimentarios.....	118
7.4. Procedencia de sedimentos.....	127
8. CONCLUSIONES.....	130
9. RECOMENDACIONES.....	133
10. BIBLIOGRAFÍA.....	134
11. APÉNDICES.....	139
11.1. Apéndice 1. Resultados analíticos.....	140
11.2. Apéndice 2. Consideraciones teóricas.....	173
11.3. Apéndice 3. Metodología y materiales.....	218
11.4. Apéndice 4. Diagramas de dispersión.....	229
11.5. Apéndice 5. Coeficientes de las funciones discriminantes consideradas en el Capítulo 6.....	240
11.6. Apéndice 6. Valores de la prueba Z, considerados en los Capítulos 6 y 7...	245
11.7. Apéndice 7. Perfil de distribución de variables del pozo “Barquisimeto”....	252
11.8. Apéndice 8. Perfil de distribución de variables del pozo “Cabudare”	253
11.9. Apéndice 9. Informes de las perforaciones realizadas por GISCA (2006) en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, estado Lara.....	CD anexo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación regional del área de estudio, en rojo se señala el área de estudio.....	3
Figura 2. Ubicación relativa de los pozos 1, 3 (estrella roja) y 6 (estrella azul). Tomado de GOOGLE MAPS (2008).....	4
Figura 3. Ubicación relativa entre pozos 1 (SPT) y 3 de Barquisimeto. Tomado de GISCA (2006).....	5
Figura 4. El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara. A: Napas de Lara y Tinaco-Tinaquillo (basado en STEPHAN 1985) B: Corte esquemático (sin escala). Tomado de PESTMAN et al. (1998).....	12
Figura 5. Mapa geológico del área de Barquisimeto-Cabudare, estado Lara. La estrella roja representa la ubicación de los pozos de Barquisimeto (pozos 1 y 3), y la estrella azul representa la ubicación del pozo de Cabudare (pozo 6). Tomado de HACKLEY, et al. (2005).....	16
Figura 6. Ubicación de las formaciones cuaternarias en el área de Barquisimeto-Cabudare, estado Lara. Tomado de MORALES, et al. (2008).....	23
Figura 7. Mapa de espesores de sedimentos en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare. En líneas rojas esta señalado el espesor de sedimentos. En estrellas azules está señalada la ubicación de las perforaciones. En tonos verdes están señaladas rocas cretácicas, en amarillo rocas cenozoicas y en blanco sedimentos cuaternarios. Tomado y modificado de SCHMITZ et al. (2007).....	27
Figura 8. Localización los pozos estudiados, y ubicación de los 7 perfiles de refracción sísmica (líneas rojas y negras), perforaciones geotécnicas realizadas en 1999 (triángulos rojos) y las perforaciones geofísicas realizadas por FUNVISIS (estrellas amarillas). Tomado de SCHMITZ et al. (2007).....	28
Figura 9. Sección Bidimensional (2D), en la parte superior derecha se observa la disposición NO-SE (en planta) de las secciones que constituyen el modelo 3D, en color rojo se muestra el perfil ampliado en la parte inferior. Tomado de REINOZA et al. (2008).....	30

Figura 9.1. Unidades morfológicas de los abanicos aluviales. Se muestra también las características del perfil transversal (arriba) y longitudinal (abajo) al sistema. Tomado de CORRALES et al. 1977.....	35
Figura 10. Ubicación geográfica de la Falla de Boconó (trayecto A-B), en rojo se encuentra resaltada el área de estudio. La estrella amarilla señala la ubicación de los pozos 1 y 3, mientras que la estrella roja señala la ubicación del pozo 6. Tomado de AUDEMARD et al. (2000).....	37
Figura 11. Sección esquemática de la cuenca de Cabudare. La estrella amarilla señala la ubicación de las perforaciones 1 y 3, mientras que la estrella roja señala la ubicación del pozo 6. Tomado de AUDEMARD & GIRALDO 1997.....	41
Figura 12.1. Perfil de distribución de las variables químicas, y de color Munsell en el pozo 1.....	56
Figura 12.2. Perfil de distribución de las variables radiométricas en el pozo 1.....	57
Figura 13.1 Perfil de distribución de las variables químicas y de color Munsell en el pozo3.....	58
Figura 13.2. Perfil de distribución de las variables radiométricas del pozo 3.....	59
Figura 14.1. Perfil de distribución de las variables químicas, y de color Munsell en el pozo 6.....	60
Figura 14.1. Perfil de distribución de las variables radiométricas en el pozo 6.....	61
Figura 15. Dendrograma generado usando las variables químicas del pozo 1.....	65
Figura 16. Grafico de las funciones discriminantes generadas con las variables químicas del pozo 1.....	66
Figura 17. Dendrograma generado usando variables radiométricas en el pozo 1.	67
Figura 18. Grafico de las funciones discriminantes generadas con las variables radiométricas del pozo 1.....	68
Figura 19. Dendrograma generado usando variables químicas y radiométricas en el pozo 1.....	68
Figura 20. Grafico de las funciones discriminantes generadas con las variables químicas y radiométricas del pozo 1.....	69
Figura 21. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 1. Las líneas	

rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes mencionado.....	71
Figura 22. Dendrograma generado usando variables químicas en el pozo 3.....	72
Figura 23. Grafico de las funciones discriminantes para el pozo 3, elaborado en base a variables químicas.....	73
Figura 24. Dendrograma generado usando variables radiométricas en el pozo 3. En el mismo se muestran las unidades y sub-unidades definidas en base al método de análisis de agrupaciones.....	75
Figura 25. Grafico de las funciones discriminantes generadas con los componentes radiométricos del pozo 3.....	75
Figura 26. Dendrograma generado utilizando variables químicas y radiométricas en el pozo 3. Se muestra la división de unidades y sub-unidades generadas en base a este método.....	76
Figura 27. Grafico de la funciones discriminantes, elaborada utilizando variables químicas y radiométricas para el pozo 3.....	77
Figura 28. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 3. Las líneas rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes mencionado.....	80
Figura 29. Diagramas de caja elaborados usando las variables químicas en los pozos 1(SPT) y 3 (pozo geofísico con bentonita).	81
Figura 30. Diagramas de caja elaborados usando las variables radiométricas de los pozos 1 (SPT) y 3(poza geofísico con bentonita).	82
Figura 31. Histogramas de frecuencia para las variables TiO_2 , K_2O y Al_2O_3 de los pozos 3 (izquierda) y 1(derecha).....	84
Figura 32. Columna estratigráfica de los pozos 1 y 3, ubicados en Barquisimeto, estado Lara. En línea roja se muestran los límites de las unidades definidas en este trabajo. Tomado de GISCA (2006).....	85
Figura 33. Dendrograma generado usando variables químicas en el pozo 6.....	87
Figura 34. Grafico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables químicas.....	88

Figura 35. Dendrograma generado usando variables radiométricas en el pozo 6.	89
Figura 36. Grafico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables radiométricas.....	90
Figura 37. Dendrograma generado usando variables químicas y radiométricas en el pozo 6.....	91
Figura 38. Grafico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables químicas-radiométricas.....	92
Figura 39. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 6. Las líneas rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes señalado.....	94
Figura 40. Diagramas de caja de variables químicas y radiométricas seleccionadas, la flecha roja indica el sentido del aumento o disminución de las variables entre los pozos de “Barquisimeto” y “Cabudare”.....	95
Figura 41. Columna estratigráfica de la perforación P-3 Barquisimeto. A la derecha se muestran las divisiones de las unidades químico-radiométricas de “Barquisimeto”, y el color Munsell de las muestras. Tomado de GISCA (2006).....	99
Figura 42. Perfil de distribución de variables químicas de “Barquisimeto”.....	103
Figura 43. Perfil de distribución de variables radiométricas de “Barquisimeto”.....	105
Figura 44. Perfil de distribución de color Munsell y relaciones químicas de “Barquisimeto”.....	106
Figura 45. Diagramas de caja para variables químicas y radiométricas seleccionadas del pozo “Barquisimeto”, para las cuatro unidades químico-radiométricas definidas en él.....	107
Figura 46. Perfil de distribución de las variables químicas de “Cabudare”. Las líneas rojas muestran los límites de unidades y las líneas negras los límites de sub-unidades.....	112
Figura 47. Perfil de distribución de las variables radiométricas de “Cabudare”.....	113
Figura 48. Perfil de distribución del color Munsell y las relaciones químicas de “Cabudare”.....	114
Figura 49. Columna estratigráfica del pozo de Cabudare. A la derecha se muestra el color Munsell. Tomado de GISCA (2006).....	115

Figura 50. Diagramas de caja de las variables químicas y radiométricas de las unidades definidas en el pozo “Cabudare”.....	116
Figura 51. Columna estratigráfica de pozos de Barquisimeto. Se muestra la correspondencia de las unidades químicas-radiométricas generadas en el presente trabajo y con unidades geológicas asociadas. Las líneas rojas verticales indican los límites de las unidades.....	119
Figura 52. Comparación entre los ciclos eustáticos propuestos por BEARD et al. (1982), y la concentración de CaO de los 40 m más superficiales de “Barquisimeto”.....	120
Figura 53. Columna estratigráfica del pozo de Cabudare. Hacia la derecha se encuentran en la columna las unidades químicas-radiométricas generadas en el presente trabajo y las unidades geológicas asociadas. Tomado de GISCA (2006).....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Columna estratigráfica resumida de la geología de Barquisimeto y alrededores. Según BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967, 1968) BUSHMAN (1959, 1965), GONZÁLEZ DE JUANA et al. (1980), MACSOTAY et al. (1987), VON DER OSTEN & ZOZAYA (1957) y GIRALDO (1985).....	15
Tabla 2. Resumen de velocidades sísmicas, profundidad e interpretación realizada en el área de estudio. Tomado de SCHMITZ et al. (2007).....	29
Tabla 3. Ubicación y cantidad de muestras usadas en el presente trabajo especial de grado.....	50
Tabla 4. Resumen de la espectrometría de rayos gamma multicanal en cuentas por segundo (cps). “n” representa el numero de muestras de cada pozo (Resumen de la tabla A1, A2 y A3, Apéndice 1).....	54
Tabla 5. Resumen de la composición química, obtenida por componentes mayoritarios en porcentaje (%) y Vanadio (ppm) (Resumen de la Tabla A4, A5 y A6, del Apéndice 1).....	55
Tabla 6. Coeficientes de correlación “R ² ” para las variables químicas del pozo 1. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico 0,437, para 32 muestras ($\alpha=0,01$).....	60
Tabla 7. Coeficientes de correlación “R ² ” para las variables químicas del pozo 3. Coeficiente de. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico de 0,296 para 73 muestras de 0,296 ($\alpha=0,01$).....	63
Tabla 8. Coeficientes de correlación “R ² ” para las variables químicas del pozo 6. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico de 0,153 para 286 muestras ($\alpha=0,01$).....	63
Tabla 9. Clasificación de las muestras por funciones discriminates del pozo 1. Casos bien clasificados 84,4%.....	66

Tabla 10. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 1. Casos bien clasificados 100%.....	67
Tabla 11. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 1. Casos bien clasificados 100%.....	70
Tabla 12. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 1, en base a los métodos estadísticos.....	70
Tabla 13. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 72,6%.....	73
Tabla 14. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 67,1%.....	75
Tabla 15. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 89%.....	77
Tabla 16. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 3, en base a los métodos estadísticos.....	78
Tabla 17. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 91,6%.....	88
Tabla 18. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 69%.....	90
Tabla 19. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 90,2%.....	92
Tabla 20. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 6, en base a los métodos estadísticos.....	95
Tabla 21. Tabla resumen de las características de las unidades definidas en “Barquisimeto”.....	102
Tabla 22. Tabla resumen de las características de las unidades definidas en “Cabudare”.....	111
Tabla 23. Comparación entre unidades encontradas en Cabudare y Barquisimeto.....	124

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, se ubican en el estado Lara, en la región noroccidental del país, estas ciudades reposan sobre antiguas terrazas fluviales en el valle del Río Turbio. En las cercanías de la ciudad de Barquisimeto, se encuentra la Falla de Boconó, la cual es una falla transcurrente de orientación noreste que posee movimiento rumbo deslizante dextral. La zona de fallas de Boconó es considerada uno de los rasgos geotectónicos más importantes en el extremo noroccidental de la placa suramericana, debido a esta se considera parcialmente el límite de la zona de deformación de la interacción entre las placas Caribe y Suramericana.

Al sur de la ciudad de Barquisimeto, se encuentra el tramo Sanare-Barquisimeto de la Falla de Boconó. GIRALDO & AUDEMARD (1997) describen una zona de relevo de esta falla, donde su falla homóloga se localiza al sur de Cabudare, trayendo como consecuencia, la formación de una cuenca de tracción (Pull Apart Basin), denominada Cuenca de Tracción de Cabudare. La misma se encuentra rellena por aproximadamente 300 m de sedimentos compuestos por niveles de conglomerado y arcilla de la Formación Guamasire, de edad Plioceno, depositada en ambiente continental, con intervalos lacustres, además de conglomerados del Pleistoceno Temprano, sobre los cuales ha sido construida parcialmente la ciudad de Barquisimeto.

Debido al gran espesor de sedimentos que existen en la cuenca de Barquisimeto - Cabudare, surge este trabajo con la finalidad de caracterizar geoquímicamente las muestras tomadas en pozos exploratorios en el aluvión de la Cuenca de Cabudare-Barquisimeto, estado Lara, para interpretar ambientes sedimentarios y definir posibles ciclos en la sedimentación.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar geoquímicamente las muestras tomadas en pozos exploratorios en el aluvión de la cuenca de Barquisimeto-Cabudare, estado Lara, con la finalidad de interpretar ambientes y unidades sedimentarias, además de definir probables ciclos sedimentarios.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis químico de componentes mayoritarios mediante fluorescencia de rayos X, análisis de radiactividad natural mediante espectrometría gamma multicanal, y determinación del color Munsell a las muestras obtenidas de los pozos geofísicos P-6, P-3, y la perforación geotécnica (SPT) P-1.
- Definir e interpretar unidades químico-radiométricas para cada pozo, a partir de variaciones verticales de las variables químicas y radiométricas.
- Procesar estadísticamente los datos obtenidos utilizando técnicas estadísticas univariantes y multivariantes.

1.4. UBICACIÓN

Los tres pozos disponibles para el estudio, dos se localizan en las ciudad de Barquisimeto y uno en la ciudad de Cabudare, ambas pertenecientes al estado Lara (figuras 1 y 2). Barquisimeto es la capital del estado Lara y del municipio Iribarren, y se ubica geográficamente, en el centro-occidente de Venezuela (a 363 km de Caracas). Por su parte la ciudad de Cabudare, es la capital del municipio Palavecino, y se ubica en la parte sureste de la ciudad de Barquisimeto. Estas muestras fueron suministradas por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y forman parte del Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Barquisimeto llevado a cabo por dicha institución.

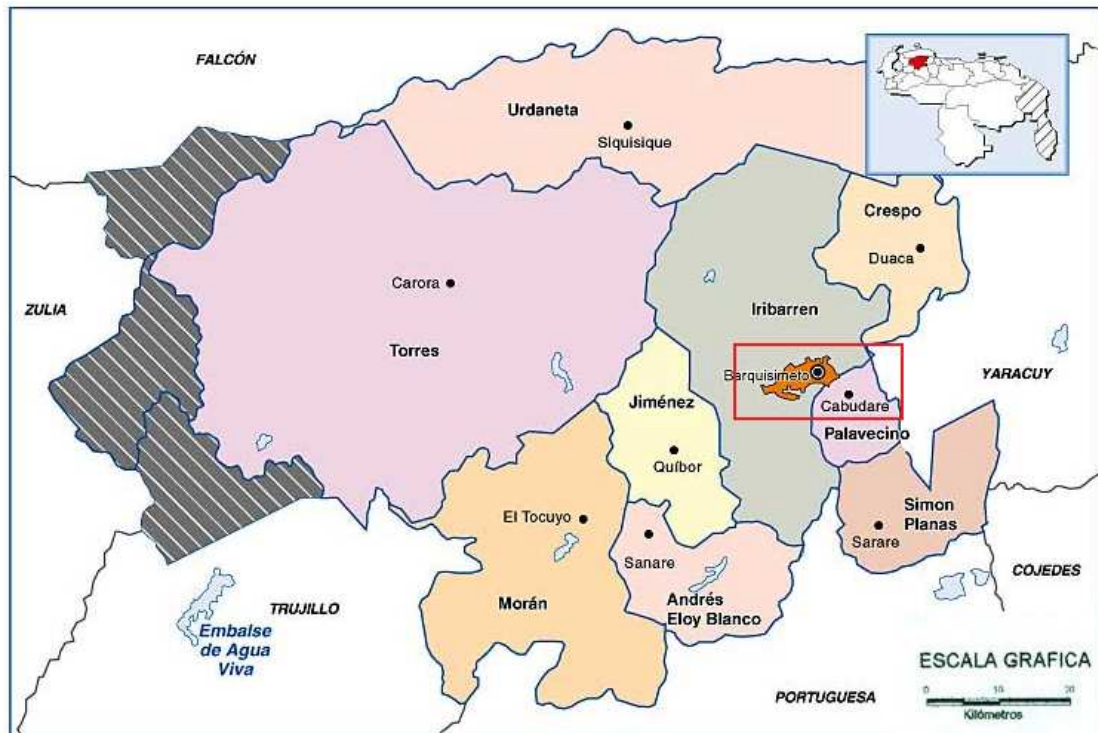


Figura 1. Ubicación regional del área de estudio, en rojo se señala el área de estudio Tomado de <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/lara.html>.

Las perforaciones P-1 (SPT) y P-3 se ejecutaron en la zona occidental de la ciudad de Barquisimeto, en el sector Obelisco, específicamente en el Núcleo de la Universidad Centro-occidental “Lisandro Alvarado” (UCLA), Decanato de Ingeniería Civil (figura 2). Ubicado en la prolongación hacia el norte de la avenida La Salle, entre las avenidas Las Industrias y Antonio Benítez, municipio Iribarren del estado Lara. La separación entre el pozo 1 (P-1) y el 3 (P-3) es de 2,5 m (Figura 3)

La perforación P-6 se realizó en la zona occidental de la ciudad de Cabudare, en el sector Tarabana, específicamente dentro de las instalaciones del Núcleo de Postgrado de Agronomía de la Universidad Central “Lisandro Alvarado”, ubicado entre la redoma de Agua Viva y la Urbanización “Chucho Briceño”, justo frente a la Urbanización Terepaima, municipio Palavecino. Esta perforación se encuentra aproximadamente a 12 km al sureste de los pozos 1 y 3.



*Figura 2. Ubicación relativa de los pozos 1, 3 (estrella roja) y 6 (estrella azul).
Tomado de GOOGLE MAPS (2008).*

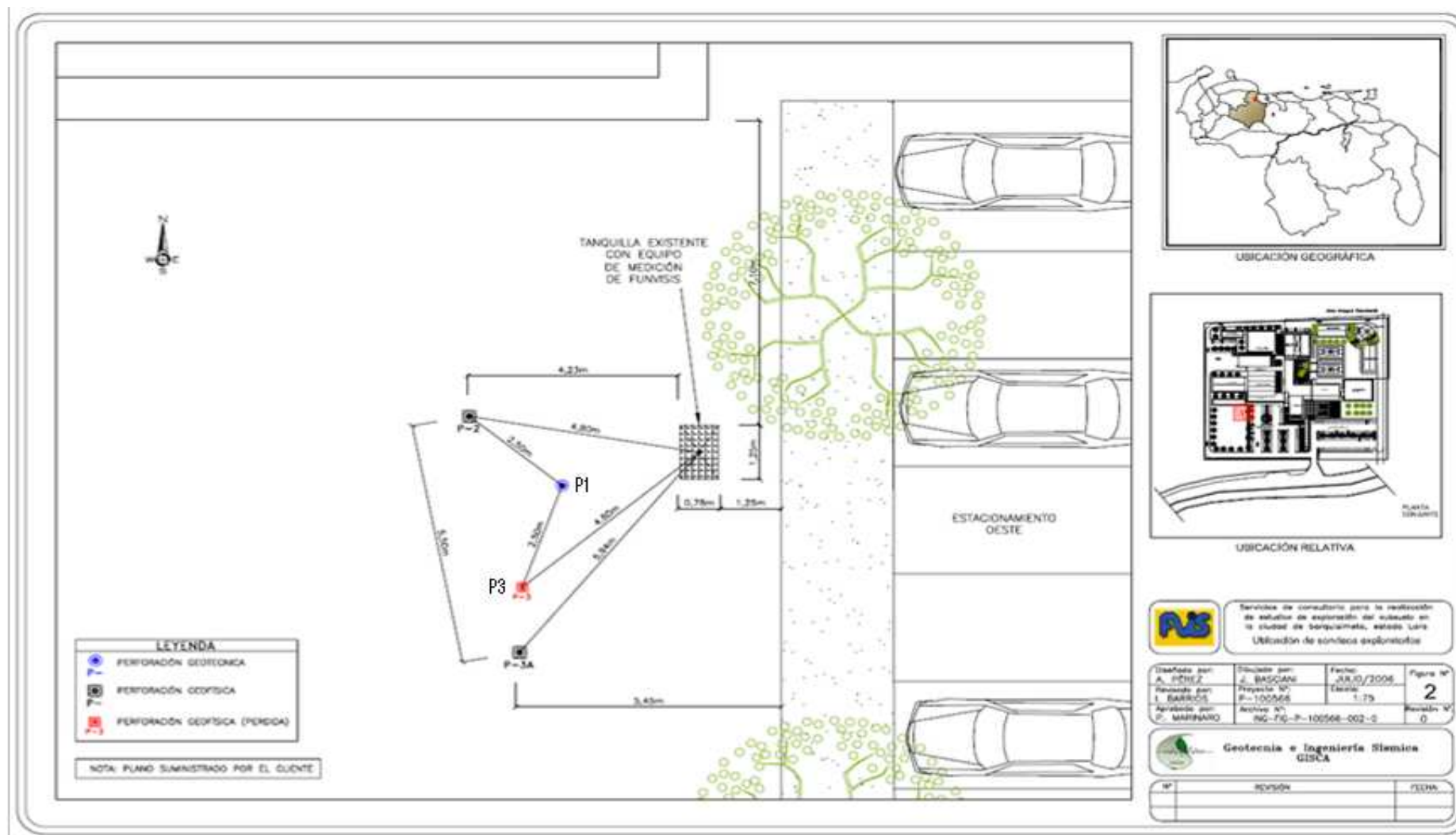


Figura 3. Ubicación relativa entre pozos 1 (SPT) y 3 de Barquisimeto. Tomado de GISCA (2006).

1.5. AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirnos alcanzar esta meta.

A la “Casa que vence las sombras”, la Ilustre Universidad Central de Venezuela y a su Facultad de Ingeniería, por brindarnos hoy la posibilidad de graduarnos de ingenieros Geólogos.

A la prestigiosa Escuela de Geología, Minas y Geofísica, formadora de hombres integrales para el desarrollo de nuestro país.

A la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), por haber financiado este trabajo de investigación por medio del proyecto de Microzonificación Sísmica.

Al Prof. Franco Urbani por ser un gran amigo y guía, por ser comprensivo, paciente, por haber confiado en nosotros y por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado.

Al Ing. David Mendi por su toda su ayuda, sugerencias y explicaciones.

A los profesores de la Escuela, por formarnos en el campo de la Geología. A los pasantes del Laboratorio Alí y Andrés.

Andrés Solórzano

Agradezco infinitamente a mis padres Elizabeth y Alfredo por su incalculable e incondicional apoyo durante estos años en la Universidad y durante toda mi vida. Ustedes han sido y serán mi ejemplo de superación, dedicación, y constancia.

A mi hermanito César por estar conmigo siempre y a toda mi familia por creer en mí.

A mis “hermanos” Emmanuel, Villegas, Luis Eduardo, Mérida, por ser amigos fieles y sinceros.

A los panas Pedro “El Bicho”, Andrés Eloy, Alexis, Kristal y Eduardo, por todo lo compartido durante estos años.

Al profesor Franco Urbani por ser un ejemplo a seguir, y por brindarme la oportunidad de realizar esta tesis.

A los profesores de la Escuela Alezones, Ruthman, Lenin, Scherer, Grande y Machillanda, por todos los conocimientos impartidos.

Por último y no menos importante a Doraly, por ser la persona que durante estos años en la U.C.V. me ha acompañado, apoyado y motivado cada día a salir adelante y a ser mejor en todos los sentidos de la vida. Gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas.... Gracias por ser mi persona especial, TE AMO.....

Pedro Varguillas

Gracias a Dios, por acompañarme siempre y darme fuerza cuando mas lo necesitaba. A la virgen de la Misericordia, mi compañera fiel de residencia.

A mi madre, cualquier palabra de agradecimiento se quedaría corta. Gracias mama por estar siempre, siempre ahí apoyándome, brindándome tu cariño y motivarme a cada día ser mejor. Te Amo!

A mi papa, por ayudarme a alcanzar esta meta. Ejemplo de amor al estudio, gracias papa por enseñarme el valor del conocimiento y tu desinteresado amor.

A Pedro Javier por ser ejemplo de constancia, esfuerzo y dedicación. Te quiero mucho hermano. A Ara, por brindarme su cariño y comprensión. A Makario, por llenar la casa siempre de alegrías con tus ocurrencias y apoyarme siempre. Te quiero, hermanito.

A mis tíos y primos, por su apoyo y cariño incondicional.

A Andrés, por su amistad y por su apoyo durante la carrera.

A mis amigos del núcleo, Ramiro, Orlando, El Guaro, Elvis, Lina y Keylis. Por su amistad y cariño durante todos estos años. A Braulio, el tipísimo, por la amistad brindada estos últimos años. A los panas de Geología, Alexis, Kristal, Angélica, Walter, Victoria, Luis y Karelis por todo lo compartido. Siempre los recordare.

Al profesor Franco Urbani, por su apoyo y paciencia durante la realización de nuestra tesis.

Al profesor Ricardo Alezones, ejemplo de dedicación y pasión al trabajo. Por todas las alegrías y momentos compartidos con el glorioso Deportivo Geología F.C. Como siempre, Gracias por todo profe.

Al ingeniero David Mendi, por su ayuda en el laboratorio 330 así como a todos los que hacen vida en el, en especial a Alí, Andrés y Enzo.

A la señora Morella, Pototo y Jenni por su ayuda en la Biblioteca.

A Leticia, por su apoyo durante estos años.

A todos, que de alguna u otra manera me ayudaron a alcanzar esta meta y no han sido nombrados. GRACIAS!

2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

2.1. MARCO GLOBAL

La zona de estudio se encuentra ubicada en lo que se conoce como el “Surco de Barquisimeto”, el cual presenta caracteres estratigráficos y estructurales particulares. En él se tienen secuencias flysch de edad Paleoceno - Eoceno Temprano sobre unidades cretácicas levemente metamorfizadas, las cuales afloran tanto al sur (Serranía de Portuguesa) como al norte (área El Tocuyo-Carora-Barquisimeto) de la Falla de Boconó. El contacto entre la secuencia flysch y la secuencia cretácica es de naturaleza discordante, de tipo angular; generándose un hiatus o pérdida de información del registro geológico en el área. La cual, puede ser asociada a levantamientos y posterior exposición de las unidades de roca sedimentarias (GARCÍA *et al.* 1977).

Las ciudades de Barquisimeto y Cabudare se encuentran sobre una terraza aluvial de edad cuaternaria, producto de una compleja historia geológica que involucra a la Falla de Boconó como el accidente tectónico principal, a partir del cual se ha generado una serie de cuencas de tracción y abanicos aluviales propios de un sistema de fallas rumbo-deslizante. La zona de fallas de Boconó es considerada como uno de los rasgos geotectónicos más importantes en el extremo noroccidental de la placa suramericana, por ser ésta uno de los contactos entre las placas Caribe y Suramérica. Gracias a este contacto entre placas, y a su régimen compresivo asociado, se dio lugar al sistema de napas que domina la región, cuyo cuerpo principal se sitúa al norte de Barquisimeto y ha sido denominado por STEPHAN (1982) como las Napas de Lara.

Las unidades cretácicas de la región se encuentran caóticamente relacionadas con las formaciones del Paleoceno-Eoceno. Dicha relación era integrada por la mayoría de los autores en el llamado “Surco de Barquisimeto”, bajo la teoría de deslizamientos submarinos causados por desplazamientos verticales en los bordes del surco, trasladándose las masas y bloques por gravedad hacia el centro del mismo (BELLIZZIA & RODRÍGUEZ, 1966). Mientras que STEPHAN (1982), amplía estos conceptos renombrando la región como “Complejo

Tectono-Sedimentario de Lara”, definiéndolo como el conjunto de afloramientos del Paleoceno-Eoceno y olistolitos asociados sedimentaria y tectónicamente al deslizamiento SSE de los estratos Caribe, y lo divide en tres grandes subconjuntos de la Formación Matatere. Entonces, el Complejo Tectono-Sedimentario de Lara y las unidades cretácicas están entrelazados por sobrecorrer en conjunto sobre el autóctono andino (STEPHAN 1982).

La ciudad de Barquisimeto se encuentra prácticamente limitada al sur por el tramo Sanare-Barquisimeto de la Falla de Boconó, encontrándose afloramientos cuaternarios deformados en la vía que conduce hacia la población de Río Claro (GIRALDO 1985). Justamente, GIRALDO & AUDEMARD (1997) describen una zona de relevo de esta falla donde su traza homóloga se localiza al sur de Cabudare, trayendo como consecuencia, la formación de una cuenca de tracción (Pull-apart basin) similar a la formada en el Valle de Yaracuy entre las fallas Boconó y Morón, descrita por CASAS-SAINZ & DIEDERIX (1992).

2.2. SURCO DE BARQUISIMETO

El Surco de Barquisimeto fue definido por RENZ *et al.* (1955) como el sitio de sedimentación flysch y deslizamientos submarinos caóticos extendida desde algún lugar al norte del Alto de Siquisique, bordeando la llamada hoy “Plataforma de Barbacoas” hasta alcanzar el estado Portuguesa, donde le ha asignado el nombre de “Surco de Portuguesa”. Los sedimentos más comunes del Surco de Barquisimeto pertenecen a la Formación Matatere, los cuales BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1966) definen como una gruesa sección de turbidita, principalmente arenisca impura lítica o feldespática, arenisca conglomerática, conglomerado lítico, etc. La arenisca está gradada y muestra marcas típicamente turbidítica; la lutita que la acompaña es limolítica.

En general, BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967) resumen los diferentes puntos de vista sobre la tectónica y sedimentación del Surco de Barquisimeto bajo tres hipótesis:

1. **Autoctonía:** algunos autores como ROD & MAYNC (1954), interpretando algunas zonas como la del Cerro Sabana en los alrededores de Carora, consideran a la lutita del

Terciario como de edad cretácica y a los bloques como parte de la secuencia interestratificada normalmente en la sección.

2. **Aloctonía según modelo de napas:** por napas se entiende un manto rocoso que avanza como una sola unidad, siendo el traslado tectónico por gravedad o por compresión cortical. VON DER OSTEN & ZOZAYA (1957) informan sobre la presencia de grandes mantos de corrimientos de rocas cretácicas sobre rocas del Cretácico temprano, en la zona comprendida entre Barquisimeto y Quibor, que se presentan hoy en día fragmentados a causa de la erosión; algunos de estos remanentes alcanzan varios kilómetros de longitud. Tales corrimientos se debieron a compresión cortical desde el noroeste.

3. **Aloctonía según el modelo de deslizamientos de bloques y mantos de gravedad:** esta última teoría es la que cuenta con el apoyo de la mayoría de los geólogos para explicar las relaciones caóticas de las unidades del Cretácico y Paleoceno-Eoceno en el Surco de Barquisimeto. RENZ *et al.* (1955), en su trabajo sobre deslizamientos submarinos durante el Terciario temprano en los alrededores de Carora, demarca el llamado “Surco de Barquisimeto” e informa sobre la presencia de grandes deslizamientos submarinos, algunos de más de 1 km de longitud y que fueron separadas por la ruptura de escarpados submarinos causados por movimientos verticales en los bordes del surco. Las masas y bloques fueron trasladados por gravedad hacia el centro del mismo, habiendo viajado algunos de ellos más de 30 km. Hacia el noroeste de Carora, además de los bloques de rocas del Cretácico Temprano y Tardío, menciona la presencia de olistostromos de rocas graníticas y gnéissicas.

2.3. EL COMPLEJO TECTONO-SEDIMENTARIO DE LARA

STEPHAN (1982) utilizó el término “Complejo Tectono-Sedimentario de Lara” para designar la secuencia sedimentaria de edad Paleógena con olistolitos, comprendida entre el corrimiento de Carora-El Tocuyo, y las rocas sedimentarias de edad Mioceno al norte, en el estado Falcón. El término se propuso para reemplazar el de “Surco de Barquisimeto”, que sugiere la presencia de una fosa y un carácter autóctono. El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara se presenta imbricado tectónicamente con las unidades cretácicas autóctonas (actuales formaciones Carorita, Bobare y Barquisimeto), estructura adquirida

durante el apilamiento progresivo de las napas hacia el sureste durante el Paleoceno-Eoceno (MACSOTAY *et al.* 1987).

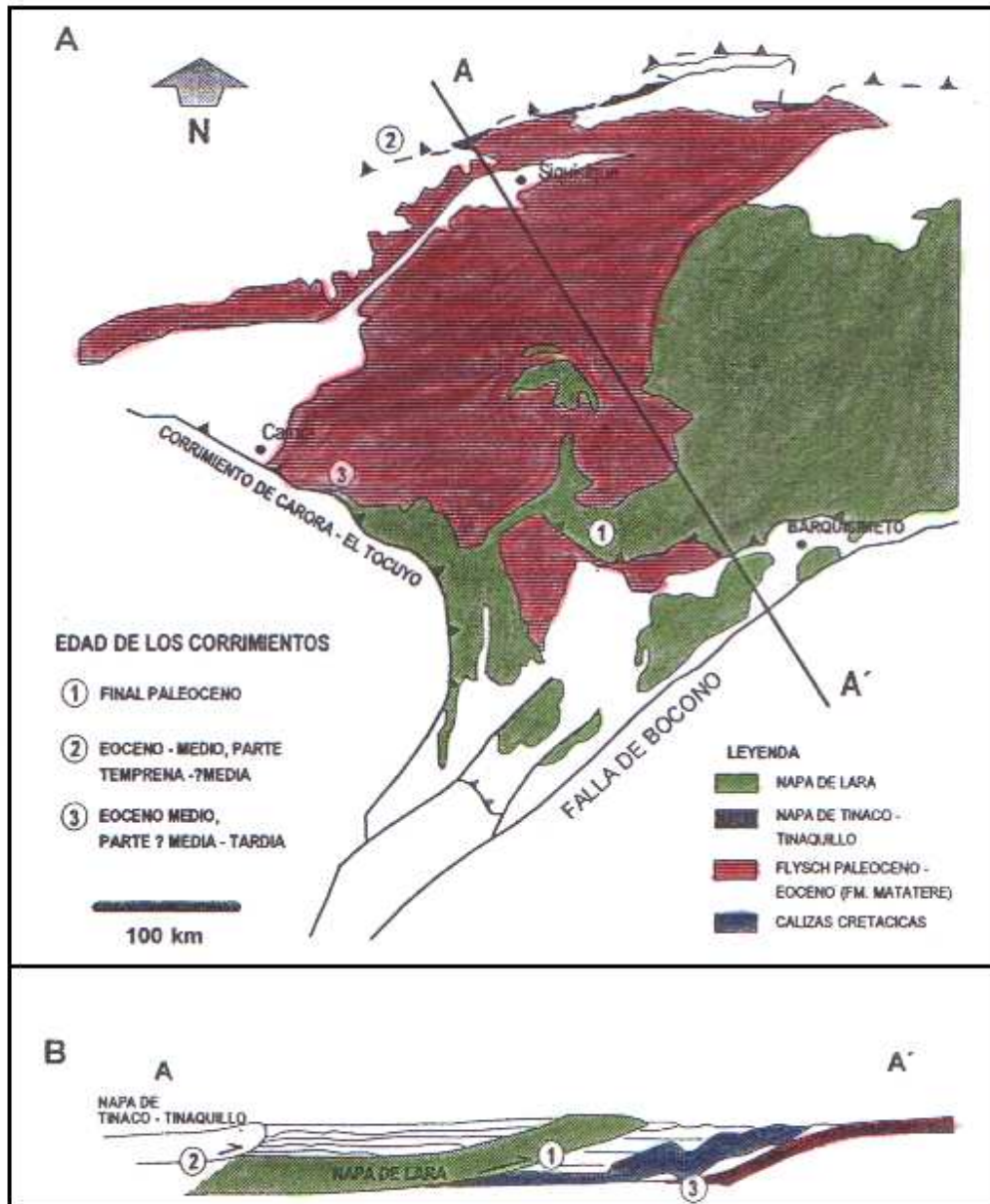


Figura 4. El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara. A: Napas de Lara y Tinaco-Tinaquillo (basado en STEPHAN 1985) B: Corte esquemático (sin escala). Tomado de PESTMAN *et al.* (1998).

Los estudios estratigráficos y estructurales realizados por STEPHAN (1982) en diversos puntos de la región modifican un poco las hipótesis realizadas anteriormente. Esto debido a que estudios anteriores han descuidado en general el aspecto tectónico o han subestimado la

importancia de las deformaciones que afectan el terrígeno en bloques. Así, la línea Carora-El Tocuyo no corresponde a la zona de discordancia del Paleoceno o borde del Surco de Barquisimeto; en efecto, se trata de la traza de un deslizamiento de orientación SSE sobre el autóctono andino, lo cual compromete simultáneamente al terrígeno Paleoceno-Eoceno y al alóctono Cretácico (STEPHAN 1977). Por otro lado, el aspecto caótico de los afloramientos del Cretácico, si bien se debe fundamentalmente a la fragmentación de las masas alóctonas en extensos olistostromos, no es menos cierto, que en algunos casos haya sido creado por los efectos de deformaciones superpuestas. Tomando en cuenta estas deformaciones post-depósito, detrás del caos aparente del Surco de Barquisimeto se desprende un dispositivo bien estructurado, el cual presenta desde el sur hasta el norte un entrelazamiento de unidades cretácicas alóctonas y de conjuntos terrígenos en bloques.

El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara, según la definición propuesta por STEPHAN (1982), comprende de base a tope un conjunto terrígeno de edad Paleoceno Temprano al Eoceno, que corresponde a la Formación Matatere de BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967). Tomando en cuenta la naturaleza de las relaciones con el Cretácico alóctono, las facies y la edad, STEPHAN (1982) diferencia tres subconjuntos para la Formación Matatere:

a) **Matatere I:** se trata de una secuencia esencialmente pelítica, concordante con el Cretácico Tardío y en cuyo tope se intercalan los olistolitos cretácicos. Su edad probable es Paleoceno Temprano.

b) **Matatere II:** la secuencia sedimentaria está dominada por sedimentos pelíticos con escasas intercalaciones de arenisca fina casi siempre en paquetes de varios metros; los olistolitos se encuentran en todos los niveles, pero particularmente con mayor abundancia hacia la base, es decir, cercanos a las unidades alóctonas cretácicas. Este conjunto, de edad Paleoceno Tardío al Eoceno Temprano, es discordante sobre el cretácico alóctono subyacente.

c) **Matatere III:** Esta sucesión se caracteriza por alternancia de arenisca y conglomerado generalmente turbios que dan al conjunto una característica de facies flysch. Las capas detríticas se reagrupan en barras prominentes continuas de 10 a 15 km particularmente en la Serranía de Matatere. Los olistolitos son relativamente menos abundantes que en Matatere II, asimismo, más bien concentrados en el tope de la secuencia

sedimentaria. Matatere III es de edad Eoceno inferior, y descansa en concordancia sobre el alóctono Cretácico.

STEPHAN (1982) reconoce varias fases de emplazamiento de la Napa de Lara. En el Paleoceno Tardío se emplazo el cuerpo principal de la napa. En el frente de la napa ocurrió deformación de los estratos cretácicos plataformales. La erosión de estos estratos proporciono material para los sedimentos marinos profundos tales como lo de las unidades I y II de la Formación Matatere, depositadas en la antefosa que se formo al sur de la napa (PESTMAN *et al.* 1998).

Alrededor del límite Paleoceno-Eoceno, ocurrió un corrimiento el cual desplazo hacia el sur los estratos cretácicos plataformales deformados (PESTMAN *et al.* 1998).

Durante el Eoceno se emplazo la Napa de Tinaco-Tinaquillo al este de la Napa de Lara y se formo la unidad de Siquisique. Hacia finales del Eoceno, una nueva fase de compresión reactivo varios corrimientos y dio origen a un nuevo corrimiento frente a la Napa de Lara: el corrimiento de Carora-El Tocuyo. Tanto el alóctono como la secuencia de antefosa se desplazaron tectónicamente hacia el sur (PESTMAN *et al.* 1998).

2.4. UNIDADES GEOLÓGICAS

A continuación se dará una breve descripción de las unidades geológicas que afloran alrededor del área de estudio (Figura 5), esto con el fin de poder visualizar las posibles fuentes de sedimentos que están rellenando la cuenca de Barquisimeto- Cabudare.

Período	Época	Formación	Litología	Observaciones
Cuaternario	Reciente	Q ₁ (~ 0,01 Ma)	Aluvión, conglomerado poco consolidado con una matriz de arena intercalaciones de arcilla	Es de gran extensión en las áreas del río Claro, río Turbio y Cabudare
	Pleistoceno	Q ₂ (~ 0,4 Ma)	Aluvión, conglomerado con cemento carbonático	Discordante encima de Q ₃ , al sur de Barquisimeto, con inclinación al norte
		Q ₃ (~ 0,95 Ma)	Aluvión, conglomerado con intercalaciones de arena y arcilla	Forma la terraza de Barquisimeto con un espesor menor de 80 m
		Q ₄ (~ 1,7 Ma)	Aluvión, conglomerado bien consolidado	Discordante sobre rocas más antiguas
Terciario	Mioceno a Plioceno	Formación El Pegón	Gravas pobremente consolidadas con cantos de hasta 25 cm de diámetro	Se componen de cuarzo, esquisto cuarzo-sericitico y caliza
		Formación Guamacire	Arenisca de grano fino, de colores gris claro a gris amarillento claro, caliza limolítica, y lutita arcillosa	El contacto superior es con aluviones cuaternarios
	Paleoceno	Formación Moran	Secuencia de lutita, arenisca y caliza que afloran en el distrito Morán, estado Lara	Corresponde a sedimentación en plataforma y borde de plataforma, y que la misma pasa lateral y verticalmente a los típicos depósitos flysch del Surco de Barquisimeto.
		Formación Matatere	Secuencias flysch de arenisca y lutita (turbidita), horizontes de capas gruesas y grandes masas alóctonas	Secuencia de cuarzo, feldespato, micas y fragmentos líticos de composición variable; caliza, filita, esquisto, cuarcita, lutita y en menor proporción, rocas volcánicas y gneis.
Cretácico	Tardío	Formación Barquisimeto	Lutita, limolita, marga compactada, ftanita, caliza, lutita silícea (chert)	Porfidoblastos de pumpellita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo
	Temprano	Formación Bobare	Arenisca cuarzosa y lutita, lentes de caliza y olistolitos del Cretácico Temprano	Los granos son angulares y subredondeados, de cuarzo, mica y feldespato en pequeñas cantidades, cementadas por material silíceo, carbonático o ferruginoso
		Formación Carorita	Secuencia de lutita, caliza, arenisca cuarcítica y marga alteradas por metamorfismo de bajo grado, expuestas al norte de Barquisimeto	Se estima 500 m de espesor para esta unidad.
		Esquisto de Mamey	Esquisto cuarzo - sericitico con colores gris, naranja y marrón, en capas generalmente lenticulares, de espesores variables.	Las rocas carbonáticas se presentan en capas macizas a foliadas en diferentes intervalos dentro de la unidad
Pre – Cretácico		Esquisto de Aroa	Esquisto carbonático - grafitoso, micáceo-grafitoso, filita grafitosa, niveles interestratificadas de mármol, meta - arenisca y meta - conglomerados, "rocas verdes"	El esquisto verde exhibe una mineralogía de zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo.

Tabla 1. Columna estratigráfica resumida de la geología de Barquisimeto y alrededores. Según BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967, 1968) BUSHMAN (1959, 1965), GONZÁLEZ DE JUANA et al. (1980), MACSOTAY et al. (1987), VON DER OSTEN & ZOZAYA (1957) y GIRALDO (1985).

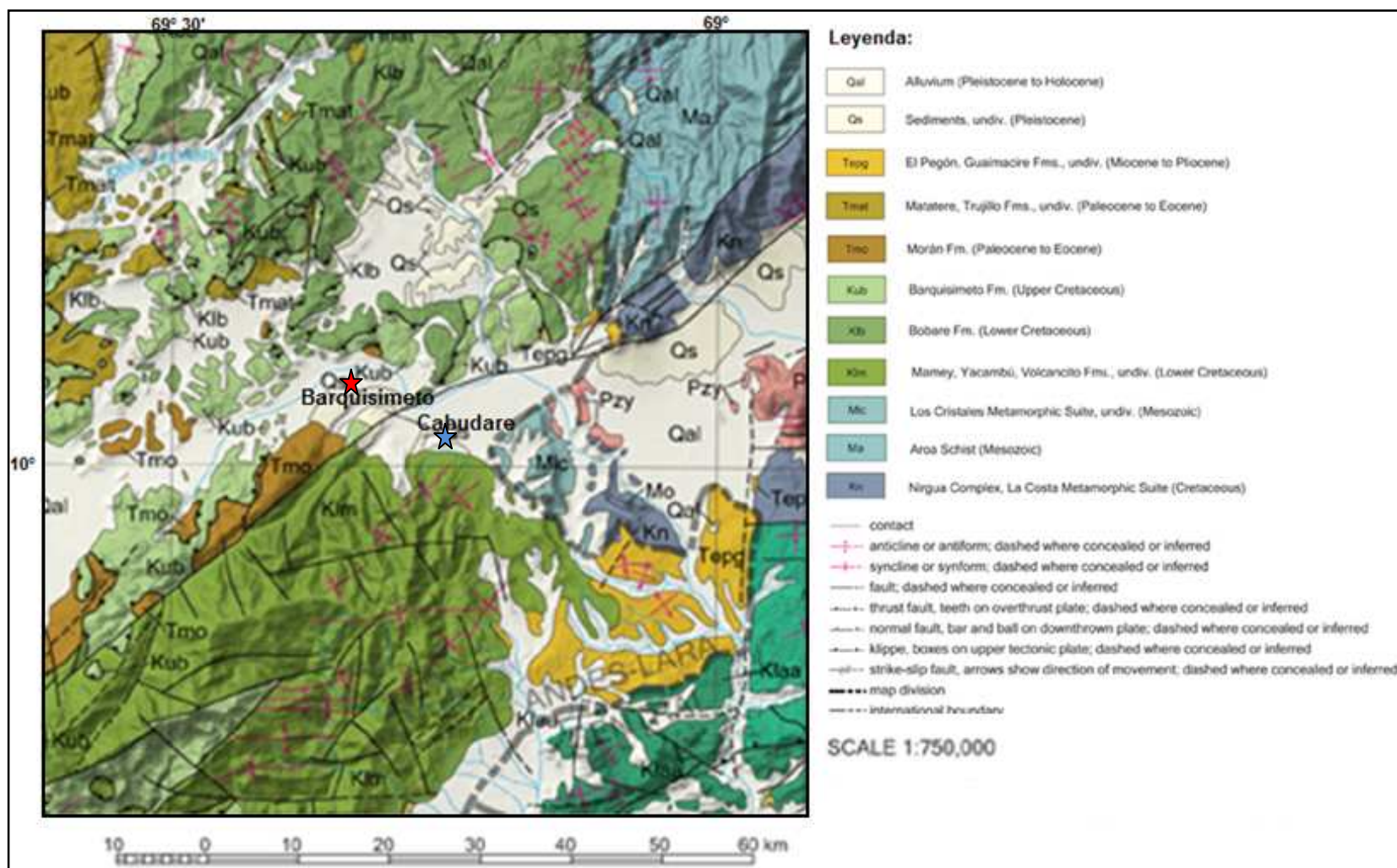


Figura 5. Mapa geológico del área de Barquisimeto-Cabudare, estado Lara. La estrella roja representa la ubicación de los pozos de Barquisimeto (pozos 1 y 3), y la estrella azul representa la ubicación del pozo de Cabudare (pozo 6). Tomado de HACKLEY, et al. (2005).

Esquisto de Aroa: esta unidad fue introducida por BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967) para designar una espesa secuencia de rocas metamórficas, expuesta en la serranía de Aroa, estado Yaracuy. Estos autores en el área de Barquisimeto dividen la Asociación Metamórfica Los Cristales originalmente propuesta por BUSHMAN (1965), en dos unidades Esquisto de Mamey (tope) y Esquisto de Aroa (base). El Esquisto de Aroa, consiste de una secuencia de esquisto carbonático grafitoso, filita grafitosa, esquisto cuarzo-micáceo-grafitoso, mármol laminado, mármol macizo y varios horizontes de esquisto verde. Estos últimos exhiben una mineralogía de zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo. El esquisto carbonático-grafitoso, micáceo-grafitoso y filita grafitosa constituyen alrededor del 60% de la unidad y consisten en calcita, grafito, sericita, cuarzo, feldespato, zoisita, pirita y clorita. El mármol laminado generalmente se interestratifica con el esquisto carbonático-grafitoso. Son comunes vetas de cuarzo y calcita generalmente paralelas a la foliación. A la unidad se le estima un espesor mínimo de 1.200 m, y se considera a la unidad de edad pre-Cretácica por su posición estratigráfica infrayacente al Esquisto de Mamey de edad Cretácico temprano.

Esquisto de Mamey: fue definido por BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967), para designar la unidad superior de las dos en que dividieron a la Asociación Metamórfica Los Cristales, definida originalmente por BUSHMAN (1959). Según los autores originales, la unidad consiste esencialmente de esquisto cuarzo - sericítico con colores gris, naranja y marrón, en capas generalmente lenticulares, de espesores variables, metaconglomerado de colores crema a gris claro, intercalados con los primeros, algunos son polimixtos intraformacionales, con fragmentos que alcanzan dimensiones de guijarros, peñas y peñones de mármol, filita y menos frecuentemente de metarenisca; metaconglomerado carbonático arcósico y mármol arenáceo conglomerático arcósico; metarenisca generalmente carbonática y feldespática, de grano grueso a medio, y color gris oscuro a crema, que meteorizan en pardo rojizos con manchas blancas, y filita negra grafitosa, localmente carbonática. Las rocas carbonáticas se presentan en capas macizas a foliadas en diferentes intervalos dentro de la unidad; muchas de ellas muestran marcada lenticularidad y en general sus espesores y continuidad lateral son bastante irregulares; son de grano fino

a medio; muchas veces son arenáceas, hasta conglomeráticas. Se estimo 1.400 m de espesor, y la edad se estimo Cretácico temprano, en base de su contenido faunal.

Las diferencias fundamentales entre los Esquisto de Mamey y Aroa, dependen de las proporciones relativas de tipos de rocas, ya que la filita y mármol en ambas formaciones son muy similares, en el Esquisto de Aroa predomina esquisto, filita grafitosa, mármol laminado y abundantes vetas de calcita ferruginosa, mientras que en el Esquisto de Mamey predominan la metaarenisca y metaconglomerado; además de la ausencia de rocas verdes en el Esquisto de Mamey (GONZÁLEZ DE JUANA *et al.*1980).

Formación Carorita: Este nombre fue empleado por BUSHMAN (1959), para designar una secuencia de lutita, caliza, arenisca cuarcítica y marga alteradas por metamorfismo de bajo grado, expuestas al norte de Barquisimeto. La formación está formada, fundamentalmente, de caliza arenáceo-feldespática de grano grueso en capas macizas, lutita, marga, conglomerado carbonático a veces guijarrosos y en algunas localidades conglomerado de peñones en los cuales se presentan fósiles del Cretácico Temprano. La parte inferior de la formación está compuesta principalmente de lutita, pero con frecuencia la arenisca cuarcítica determina las características de la superficie, produciendo los bloques sueltos que cubren muchas laderas (BUSHMAN 1965). Se estima 500 m de espesor para esta unidad. El conjunto faunal sugiere que la Formación Carorita cubre la mayor parte del Cretácico temprano: Valanginiense al Albiense. BELLIZIA & RODRIGUEZ (1968) plantean que la formación estaría representada al norte de Barquisimeto por un bloque alóctono de unos 8 km de longitud y 3,5 km de anchura posiblemente pertenecientes a la Asociación Metamórfica Los Cristales (Esquistos de Aroa y Mamey), esta interpretación se apoya esencialmente en el hecho de que los afloramientos de la Formación aparecen a menudo aislados en medio de los de la Formación Bobare. Sin embargo MACSOTAY *et al.* (1987) sugiere que este aislamiento es el resultado de la tectónica y la posterior erosión de las rocas, además que los afloramientos aislados de la Formación Carorita corresponden en la mayoría de los casos a núcleos de los anticlinales preservados en el seno de la Formación Bobare.

Formación Bobare: Este nombre fue introducido por BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1966), para designar una espesa sección de arenisca y lutita expuesta en la serranía de Bobare. La unidad consiste esencialmente de arenisca cuarzosa y lutita; la primera es de color gris oscuro, gris claro o crema cuando está fresca y meteoriza en rojizo, marrón amarillento y crema, de grano variable desde muy grueso hasta fino con predominio de grano medio; los granos son angulares y subredondeados, de cuarzo, mica y feldespato en pequeñas cantidades, cementadas por material silíceo, carbonático o ferruginoso; la arenisca aflora en capas delgadas y macizas de más de 2 m de espesor. La lutita y limolita son oscuras en estado fresco y meteorizan a gris claro, amarillento, marrón, verdoso y purpurino; son frecuentes los lentes delgados y concreciones de material ferruginoso. La llamada lutita blanca, denominada "lutita caolinítica" por BUSHMAN (1959, 1965) y CORONEL & RENZ (1960); es blanda, untuosa, de color crema, blanco crema o gris azulado. El espesor de la formación se estima en 1.700 m. Apparently la Formación pasa transicionalmente hacia el este al Esquisto de Mamey, y debido a los efectos del deslizamiento gravitacional, las relaciones estratigráficas con la Formación Barquisimeto no son claras.

Formación Barquisimeto: BUSHMAN (1959), usa este nombre para designar rocas de la secuencia cretácica que aflora en la región de Barquisimeto, estado Lara. La Formación está compuesta por lutita, limolita, marga compactada, ftanita y caliza, de color gris oscuro a negro en estado fresco y tonos muy claros de gris al meteorizar. Las capas de caliza son muy discontinuas, y se destacan más en la parte inferior de la Formación. Los porfidoblastos de pumpellita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo. Para su formación la pumpellita ($\text{Ca}_2[(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Al}_2(\text{OH})_2/\text{SiO}_4/\text{Si}_2\text{O}_7] \cdot \text{H}_2\text{O}$) requiere de presión confinante e influencia térmica moderada; también puede formarse en zonas de intenso cizallamiento acompañado de bajas temperaturas. Esta última posibilidad es quizás la más favorable para explicar la presencia de este mineral en la región de Barquisimeto. Su espesor se estima en 1.700 m. Según MACSOTAY, la Formación se depositó en hiatus y discordancia leve local, sobre la Formación Bobare, y se halla cubierta en discordancia angular y erosional por la Formación Matatere. En base al contenido faunístico y sus relaciones de campo, la unidad se considera de edad Cenomaniense-Maastrichtiense.

Formación Matatere: BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1967) introdujeron este nombre para designar una espesa secuencia tipo flysch, asociada con varios horizontes de capas de peñones. La unidad consiste en una gruesa sección de turbidita, representadas por arenisca variable, desde impura lítica a impura feldespática, con varios horizontes de arenisca conglomerática y conglomerado lítico. Estas rocas se componen de cuarzo, feldespato, mica y fragmentos líticos de composición variable: caliza, filita, esquisto, cuarcita, lutita y en menor proporción, rocas volcánicas y gneis. La matriz arcillosa, a veces arcilloso-carbonática, constituye el 10-25% del volumen de la roca. La arenisca constituye entre 25 a 35% del volumen de la secuencia. Por su parte la lutita, generalmente limolítica o arenácea, es negra en estado fresco y meteoriza en verdoso o marrón, con estratificación irregular; presentan fracturas concoidales características. A lo largo de los planos de estratificación y cizallamiento es frecuente encontrar calcita y a veces yeso. Los bloques deslizados dentro de la Formación Matatere, de tamaño variable entre peñones y verdaderos bloques montañosos, provienen de la Formación Barquisimeto y de arenisca, rocas graníticas y gnéisicas del Cretácico temprano. A la formación se le asigna una edad Paleoceno-Eoceno. Las condiciones sedimentarias de la unidad se asemejan a las facies del flysch europeo y su sedimentación se atribuye en gran parte a corrientes de turbidez.

Formación Morán: Este término fue introducido por VON DER OSTEN & ZOZAYA (1957), para designar una secuencia de lutita, arenisca y caliza que afloran en el distrito Morán, estado Lara. La formación está dividida en dos miembros: el Miembro Lutita de El Tocuyo, unidad inferior de la formación, comienza en su base con lutita gris, la cual, hacia arriba, pasa a lutita negra, marrón-verdoso, marrón y rojizo. Hacia el tope, se encuentra lutita de color rojo vino tinto, amarillo, negro y gris verdoso. El Miembro Areniscas de Botucal consiste de ortocuarcita de color blanco a crema, que pasa a amarillo o marrón rojizo por meteorización. El tamaño de los granos varía de fino a grueso llegando a conglomerado de grano fino. Los granos son subangulares a subredondeados. La arenisca forma capas de 50 cm a 30 m de espesor. La caliza de la parte superior del Miembro Lutitas de El Tocuyo tiene colore gris, crema y negro, en general, son fosilíferas, con abundantes fragmentos de moluscos, foraminíferos y algas. BUSHMAN (1965) indica por lo menos 500 m de espesor en el área de Barquisimeto. El contenido fosilífero indica que la edad de la

formación puede extenderse desde el Cretácico Tardío, hasta el Eoceno Temprano. BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1968) sostienen que la Formación Morán corresponde a sedimentación en plataforma y borde de plataforma, y que la misma pasa lateral y verticalmente a los típicos depósitos flysch del Surco de Barquisimeto.

Formación Guamacire: propuesta originalmente por BUSHMAN (1959), para designar una secuencia de arenisca de grano fino, caliza limolítica, marga y lutita arcillosa de color gris azulado claro, y gris amarillento claro, mal consolidadas y la mayor parte carbonática, que afloran al sur de Barquisimeto. La formación presenta al menos 100 m de espesor, y yace discordantemente sobre la Asociación Metamórfica Los Cristales, del Cretácico. El contacto superior es con aluviones cuaternarios. En base a fósiles, se estima que la formación es de edad Mioceno a Plioceno. BUSHMAN (1965) afirma que encontró afloramientos diseminados, lo que indica que en el pasado tuvo amplia distribución. Debido a su litología blanda y no resistente, el único sitio donde se ha preservado es en los bloques hundidos de las fallas o bajo la cobertura del aluvión.

Formación El Pegón: fue descrita originalmente por BUSHMAN (1965) para designar una secuencia de gravas pobremente consolidadas con cantos de hasta 25 cm de diámetro que afloran en la quebrada El Pegón, al norte de Yaritagua. Las gravas están toscamente estratificadas y mal escogidas, asociadas con pequeños lentes de arena amarilla, las gravas al meteorizar tienen un aspecto general amarillo a naranja y se componen de cuarzo, esquisto cuarzo-sericitico y caliza. Las mismas yacen en discordancia sobre rocas metamórficas del mismo tipo de las rocas de donde se derivaron (Esquisto de Mamey). La mayor parte del endurecimiento observado en la gravas es debido al cemento carbonático. En la pare meridional de la quebrada La Quinta, se encuentran unas arenas de similares a la Formación Guamacire, con ostrácodos pobremente preservados; estas arenas están interestratificadas con gravas carbonáticas de tipo El Pegón, compuesto de fragmentos angulares o subredondeados, de cuarzo, esquisto y caliza. La Formación El Pegón podría ser parcialmente equivalente a la Formación Guamacire y se le considera de edad Mioceno-Plioceno. Además se estima un espesor de 100 m. GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980)

considera a las Formaciones Guamacire y El Pegón como de origen continental y generalmente sin fósiles.

Unidades cuaternarias: GIRALDO (1985) subdivide el Cuaternario de Barquisimeto y sus alrededores en cuatro unidades, e introduce la hipótesis de que los sedimentos fueron depositados durante períodos glaciales debido a menos vegetación con lluvia concentrada en eventos extremos. Según esta hipótesis, las edades mínimas de los cuatro unidades son: Q₁: 0,01 Ma.; Q₂: 0,4 Ma.; Q₃: 0,95 Ma.; Q₄: 1,7 Ma (figura 6).

Q₃ y Q₁ son las dos unidades cuaternarias con mayor extensión y presentan rasgos geomorfológicos distintos. Q₃ forma la terraza perfectamente plana sobre la cual ha sido construida parcialmente la ciudad de Barquisimeto. Luego, unos 7 km al noreste de Barquisimeto, existe otra sección de Q₃ con las mismas características. Al sur del Río Turbio la unidad Q₃ tiene una pendiente muy suave hacia el norte y muchas quebradas provenientes del Cerro Manzano se han introducido en la misma y la han interceptado; sin embargo, aún se puede observar mediante fotos aéreas una envolvente de los remanentes topográficos de esta terraza que sugiere una topografía ligeramente inclinada. Estas observaciones y afloramientos de Q₃ al sur de la Falla de Boconó indican que el ciclo sedimentario de Q₃ fue de gran extensión en el área cartografiada. Su espesor alcanza en el talud del Río Turbio 60 m (BECHTOLD 2004).

La otra unidad bien definida son los sedimentos más recientes, el Cuaternario Q₁. Geomorfológicamente, corresponden a zonas de topografía baja, a ambos lados de los cursos actuales de los ríos Turbio, Claro y la Ruezga, que erosionaron fuertemente los sedimentos de Q₃. Considerando las llanuras de inundación de los ríos, Q₁ es de poco espesor pero cubre también, con gran extensión, la Cuenca de Tracción de Cabudare. Es posible que la subsidencia haya evitado la erosión del Q₃ en esta región y, además, que Q₁ desarrollara un mayor espesor (BECHTOLD 2004).

De menor extensión son los sedimentos de Q₂, que están situados al sur de Barquisimeto y Cabudare con una pendiente suave al norte. Q₂ yace discordante encima de Q₃ y parece

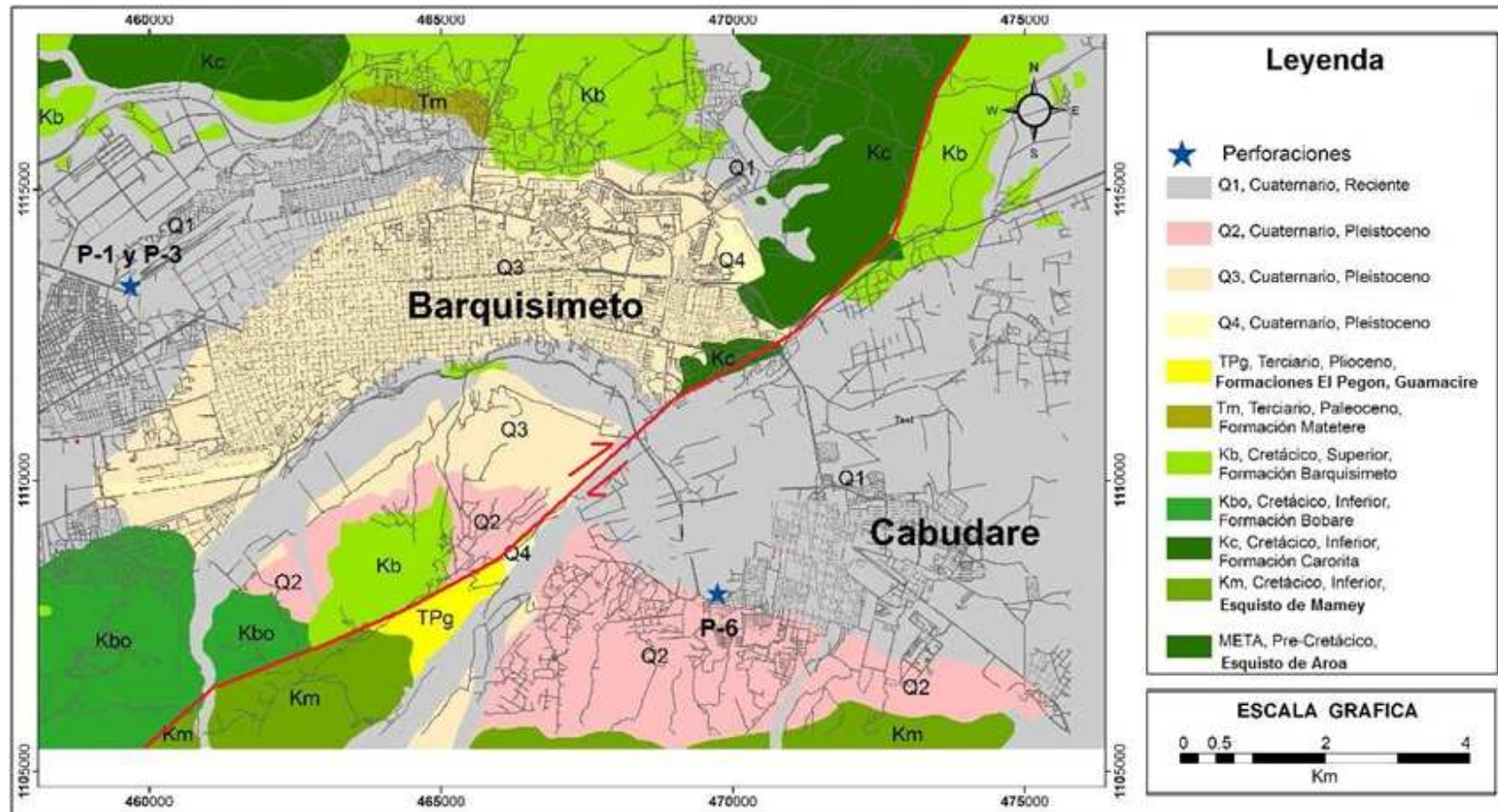


Figura 6. Ubicación de las formaciones cuaternarias en el área de Barquisimeto-Cabudare, estado Lara. Tomado de MORALES, et al. (2008).

que su depositación ocurrió de forma local y con mucha menor extensión que Q₃. De Q₄ solo existen dos afloramientos pequeños en el área, uno al este de Barquisimeto y otro en el talud del Río Claro. Q₄ yace discordante encima del Plioceno. No existen evidencias de su extensión en el pasado y se desconoce si forma parte del relleno de la cuenca de Cabudare y debajo de la terraza de Barquisimeto (BECHTOLD 2004).

Los aluviones Q₁ son vertidos a lo largo de los grandes valles o planicies: Cabudare, Río Turbio y Río Claro. Estos se caracterizan por la presencia de conglomerado mal consolidado (de matriz arenosa) con intercalaciones de niveles arcillosos, cuyo color en conjunto es amarillento; la edad de estos sedimentos es considerada aquí como Pleistoceno Tardío-Holoceno. Q₂, en discordancia sobre los sedimentos Q₃, está compuesto de conglomerado cementado por una matriz carbonática. Los sedimentos Q₃ constituyen la terraza de Barquisimeto, cuyo espesor no sobrepasa los 80 m. La característica principal de esta serie es la intercalación del conglomerado con horizontes arenosos y arcillosos de colores amarillento y anaranjado; su edad estimada es Pleistoceno Temprano (GIRALDO 1985).

La discordancia entre el Plioceno y los sedimentos Q₄ está muy bien expuesta a lo largo de la vía descendiente de El Manzano hacia Río Claro. Los afloramientos de conglomerado que se sitúan al este de Barquisimeto son igualmente reportados en la serie sedimentaria Q₄. El color general de estos sedimentos es anaranjado y están bien consolidados; Q₄ es considerado como un Cuaternario antiguo-medio.

BUSHMAN (1965) observo al sur del Río Turbio que el aluvión comúnmente es carbonático, y a menudo parcialmente endurecido por cemento carbonático. Los cantos y guijarros son subangulares a subredondeados y consisten de esquisto cuarzo sericítico, caliza gris azulada, esquisto carbonático, cuarzo y fragmentos rotos de calcita de color anaranjado. La coloración general de los afloramientos de este aluvión Cuaternario es amarillo naranja a marrón amarillento claro.

Caliche en el área de Barquisimeto - Cabudare

En ciertas partes del área, el caliche está ampliamente extendido y es muy conspicuo. El termino caliche es usado para designar un material carbonático, de color crema claro, que meteoriza a un color blanco grisáceo más oscuro, que también puede presentar tonos gris amarillento claro y salmón. BUSHMAN (1965) lo ha estudiado y los párrafos siguientes corresponden a sus principales hallazgos.

En al área de Barquisimeto, el caliche se encuentra en varios horizontes en el suelo y en el aluvión expuestos en las orillas de los barrancos; también se encuentra en el fondo de estos barrancos donde hay guijarros y cantos rodados de todos los tamaños. En la zona muchos horizontes de grava en los depósitos aluviales parecen estar regularmente estratificados, ya que están cementados por caliche; también se encuentran, a lo largo de los cursos de las quebradas, grandes masas de caliche.

Igualmente es de caliche la corteza dura de las laderas de muchas colinas, donde están expuestas las calizas de la Formación Carorita y la parte inferior de la Formación Barquisimeto; esta corteza dura tiene más de un metro de espesor en los pozos perforados en Cerro Gordo, al sur de la cantera de la planta de cemento se encuentran regados en la ladera fragmentos y laminas de caliche.

La formación de caliche en el área de Barquisimeto-Cabudare puede ser debida en parte al movimiento ascendentes de aguas ricas en cal que se depositan en la superficie o también a lixiviación por aguas descendentes y sedimentación de caliche a profundidad; pero hay fuertes indicios que sugieren que las aguas superficiales y la meteorización juegan un papel importante en el desarrollo de caliche en el área.

Durante las sequias, el curso de muchas quebradas es de color lechoso, debido a la alta concentración de cal que llevan en solución. La grava del lecho de los arroyos se cubre de caliche. Los arroyos que fluyen sobre capas macizas resistentes y forman cascadas,

depositan caliche en la rora, pues a medida que se forma la espuma, la tasa de evaporación aumenta y se deposita CaCO_3 .

Mapa isópaco de espesores de sedimentos (SCHMITZ *et al.* 2007)

SCHMITZ *et al.* (2007), generaron un mapa isópaco de sedimentos (Figura 6), para el cual se incluyó información de la estimación de los espesores de sedimentos perfiles sísmicos realizados por DE MARCO (2004) y SCHMITZ *et al.* (2007). Se complementó la información con la estimación de espesor de sedimentos del modelado gravimétrico 3D de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, así como los datos de profundidad aportados por los pozos realizados por FUNVISIS en 2006 en las instalaciones del Decanato de Ingeniería Civil de la UCLA y Postgrado de Agronomía. En el mapa (figura 6) se observan valores superiores a 120 m en la terraza de Barquisimeto, llegando inclusive a los 150 m en su parte más profunda entre la Urbanización Santa Inés y la Plaza Miranda. Adicionalmente en la cuenca de Cabudare se plantea que la profundidad del basamento rocoso se encuentra desde aproximadamente los 200 m a los 340 m de espesor en sentido oeste-este, haciéndose más profundas éstas hacia la parte noreste de la cuenca. (Figura 7)

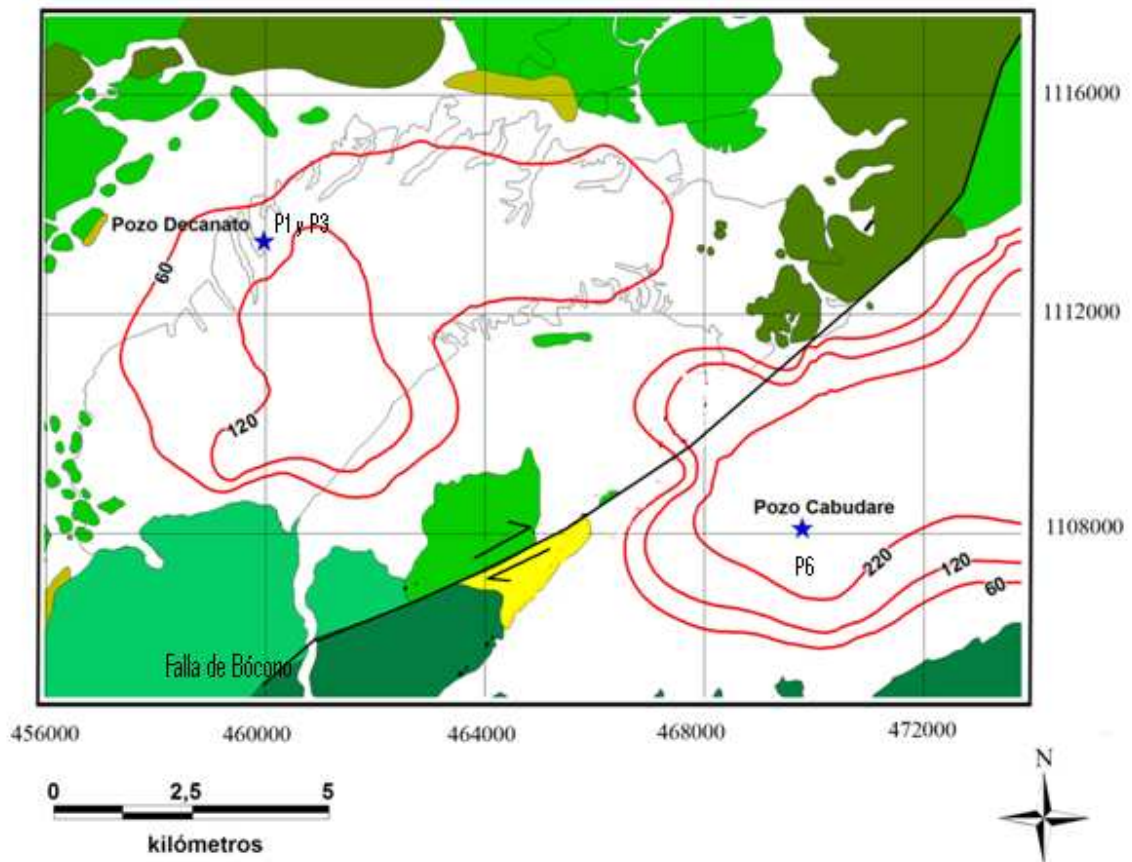


Figura 7. Mapa de espesores de sedimentos en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare. En líneas rojas esta señalado el espesor de sedimentos. En estrellas azules está señalada la ubicación de las perforaciones. En tonos verdes están señaladas rocas cretácicas, en amarillo rocas cenozoicas y en blanco sedimentos cuaternarios. Tomado y modificado de SCHMITZ et al. (2007).

Para poder generar el mapa de sedimentos de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare se realizaron en 2007, 5 perfiles sísmicos, uno en Barquisimeto y 4 en Cabudare. Los mismos fueron complementados por las 2 líneas sísmicas elaboradas en 2002 por DE MARCO, datos geotécnicos recolectados por FUNVISIS en 1999, y perforaciones geofísicas y geotécnicas realizadas en 2007 (Figura 8).

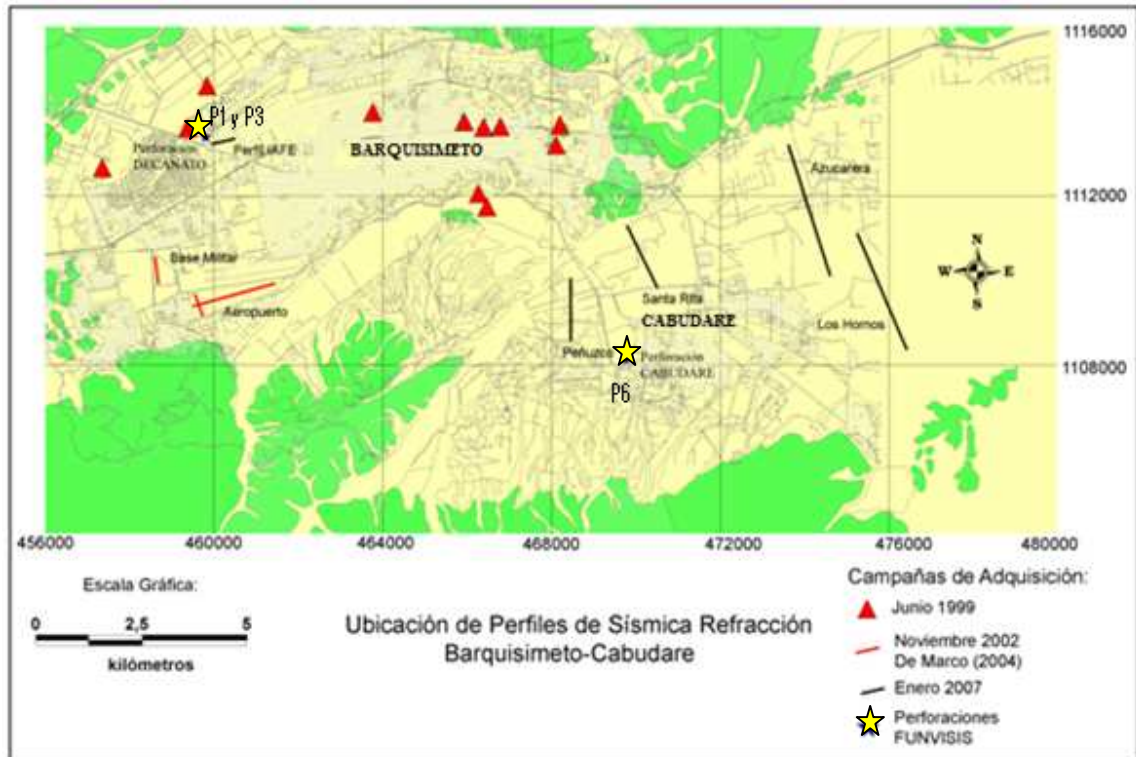


Figura 8. Localización los pozos estudiados, y ubicación de los 7 perfiles de refracción sísmica (líneas rojas y negras), perforaciones geotécnicas realizadas en 1999 (triángulos rojos) y las perforaciones geofísicas realizadas por FUNVISIS (estrellas amarillas).
Tomado de SCHMITZ et al. (2007)

A continuación, se presenta de forma resumida la interpretación de las 7 secciones sísmicas (2007) correspondientes a cada uno de los perfiles (tabla 2), basada en las correlaciones y en cálculos aproximados de las velocidades y profundidades de los trenes de ondas observados.

Tabla 2. Resumen de velocidades sísmicas, profundidad e interpretación realizada en el área de estudio. Tomado de SCHMITZ et al. (2007)

Perfil	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Interpretación
IAFE (terrazza aluvial)	1000	450	15	Suelo y sedimentos sueltos
	1650	950	60	Sedimentos de baja plasticidad de la terraza
	2200	1100	95 a 120	Arenas arcillosas con gravas
	3150	1650		Areniscas Formación Bobare
Base Aérea (terrazza aluvial)	600	200	2 a 7	Suelo
	1250	750?	35 a 40	Sedimentos sueltos
	2250	950?	90 a 100?	Sedimentos consolidados
	3750?			Formación Bobare
Aeropuerto (terrazza aluvial)	800	450	5	Suelo
	1350	900	60	Sedimentos sueltos
	2200-2500	1400	150	Sedimentos consolidados
	3200	1900-2000		Formación Bobare
Santa Rita (planicie aluvial)	700-800	400	40 a 70	Sedimentos sueltos de la cuenca a sedimentos intermedios
	2600	850-1100?	100 a 280	Sedimentos consolidados
	3650	1500		Formación Mamey
Peñuzco (planicie aluvial)	750	350	10 a 40	Sedimentos sueltos de la cuenca
	1300?	750-950	95	Sedimentos intermedios
	2150?	1200	220	Sedimentos consolidados
	3400-3500	1700		Formación Mamey
Los Hornos (cuenca de tracción)	350-250	250-150	5 a 25	Suelo y sedimento suelto
	1350-1500?	300-550	40 a 100	Sedimentos sueltos de la cuenca
	2500?	750-850	150 a 340	Sedimentos consolidados
	3000-3500	1600		Formación Mamey
Azucarera (cuenca de tracción)	700-800	150-300	20 a 35	Suelo y sedimento suelto
	1500-1850	400-500	110 a 140	Sedimentos sueltos de la cuenca
	2600	700-900	250 a 400	Sedimentos consolidados
	3400	1250		Formación Mamey

Posteriormente REINOZA *et al.* (2008), elaboró un modelo 3D del espesor de los sedimentos, tanto de la terraza aluvial de Barquisimeto como los de la cuenca de tracción de Cabudare, utilizando análisis de datos gravimétricos, ruido sísmico ambiental (Nakamura o método H/V) y los valores de profundidad obtenidos mediante el trabajo de SCHMITZ *et al.* (2007). En ese modelo 3D (figura 9) se puede observar la forma de cuenca de tracción con dirección preferencial NE-SW con espesores máximos calculados de 400 m. En la terraza se ven valores máximos de profundidad de los sedimentos de 150 m hacia la parte central y suroeste de la ciudad.

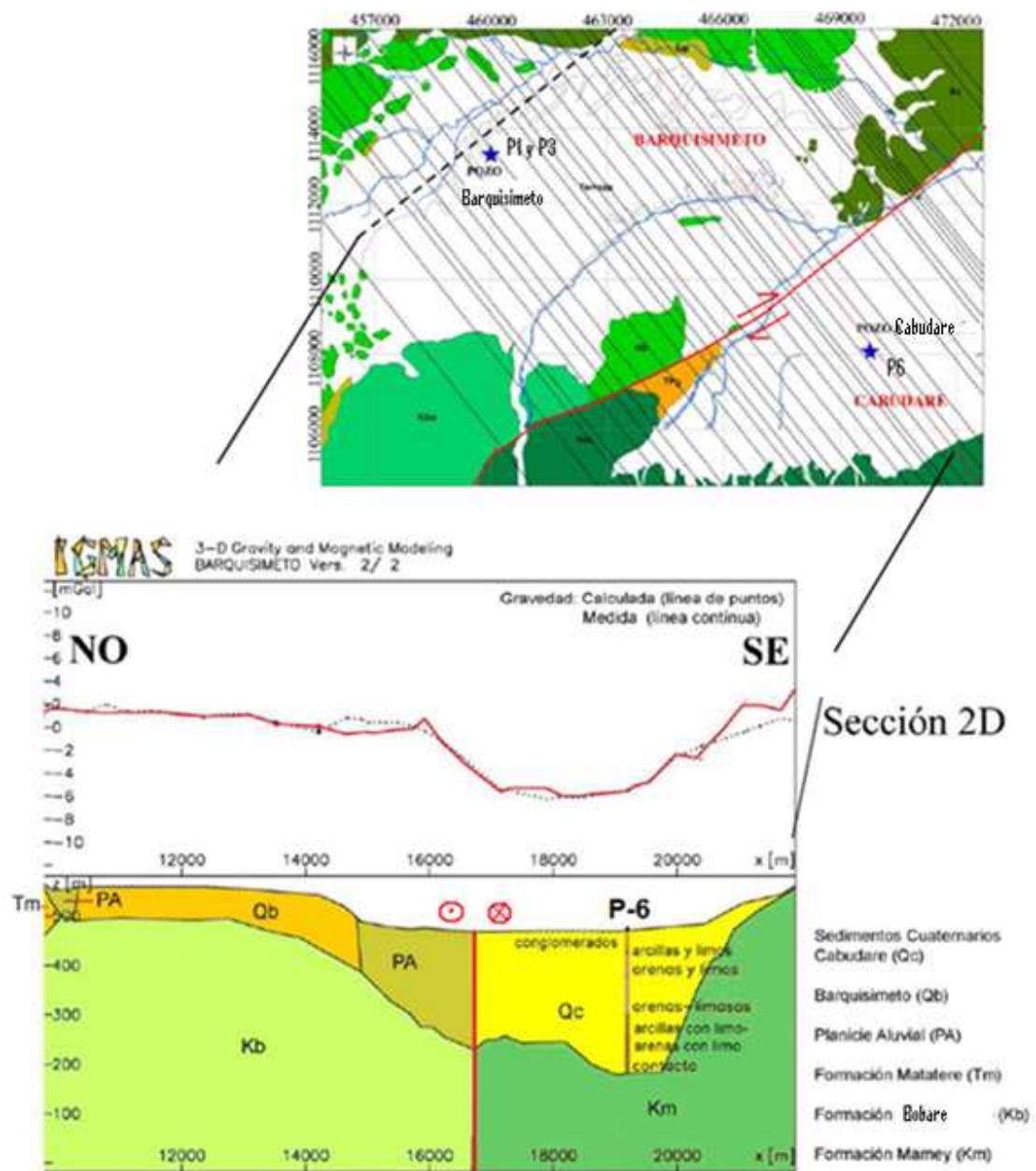


Figura 9. Sección Bidimensional (2D), en la parte superior derecha se observa la disposición NO-SE (en planta) de las secciones que constituyen el modelo 3D, en color rojo se muestra el perfil ampliado en la parte inferior. Tomado de REINOZA et al. (2008).

2.5 AMBIENTES SEDIMENTARIOS

A continuación se describirá brevemente los posibles ambientes sedimentarios que pueden existir en la zona de Barquisimeto - Cabudare.

Ambiente Fluvial.

Constituye uno de los medios continentales de mayor importancia estratigráfica, puesto que en ellos se han acumulado gran cantidad de sedimentos. Por otra parte, dada la universalidad de las corrientes fluviales, sus depósitos tienen una amplia distribución geográfica. Los sedimentos de un medio fluvial presentan características diversas según la zona en que se hayan depositado; unos representan la acumulación en el canal; otros, la que tuvo lugar en sus márgenes; finalmente, existen sedimentos correspondientes a zonas alejadas del cauce (CORRALES *et al.* 1977).

Según CORRALES *et al.* (1977) entre los depósitos del canal se encuentran los siguientes:

Depósitos de fondo de canal ("channel lag"): Son los que se sitúan en la parte más profunda del canal, son discontinuos, presentando forma lenticular. El material que los constituye es grueso, pudiendo también encontrarse fragmentos de madera, cantos blandos, etc.

Depósitos de islas (barras del canal): Son depósitos típicos de ríos anastomosados. Su granulometría varía según se trate de corrientes montañosas, en cuyo caso estarán formados por material grueso, o de tramos en los cursos bajos de ríos que transportan una gran cantidad de sedimentos, siendo entonces la granulometría fina.

Depósitos de barra lateral "Point bar": Son aquellos que se acumulan en la parte interna de los meandros; contienen los sedimentos más gruesos de los transportados por la corriente, observándose en ellos una granoselección con disminución del tamaño de grano hacia la parte superior.

CORRALES *et al.* (1977) plantean que los depósitos de las márgenes del cauce comprenden:

Depósitos de relleno de depresiones en los “Point bar”: La superficie de un “point bar” presenta una serie de crestas y depresiones; estas últimas reciben sedimentos finos -limos y arcillas durante épocas de lluvia. Comparables a éstos son los depósitos que se forman en algunos canales de ríos anastomosados, que pueden quedar total o parcialmente cerrados en su extremo superior (Doeglas, 1962); los sedimentos que en ellos se acumulan son arenas finas y limos, en la porción aguas arriba del canal, y arcillas en el extremo inferior (aguas abajo); en los sedimentos arenoso-limosos pueden encontrarse ripples de gran tamaño linguoides; en las arcillas se forman grietas de desecación.

Depósitos de diques: Forman bandas que bordean los cauces. Sus sedimentos están entre los más gruesos de los depositados fuera de aquéllos: arenas finas, limos y arcillas, generalmente, disminuyendo el tamaño de grano hacia la llanura de inundación, así como aguas abajo.

Depósitos enraizados en grietas (“Crevasse splay”): En épocas de lluvia pueden producirse fisuras en los diques, a través de las cuales el agua circulará hacia la llanura de inundación. En estas zonas se produce, entonces, un depósito de sedimentos cuyo grosor puede ser incluso superior al del material de los diques; suelen ser arenas de grano medio a fino, que alternan con limos arenosos y arcillosos.

Depósitos de llanura de inundación: Se encuentran en las zonas más alejadas del cauce. Están formados por sedimentos de grano fino, que han sido transportados en suspensión: limos y limos arcillosos. Puesto que durante largos periodos de tiempo quedan expuestos al aire presentan grietas de desecación, y si el clima es suficientemente seco pueden mostrar costras calcáreas o ferruginosas.

Ambiente lacustre

El ambiente lacustre sólo se origina en zonas continentales montañosas y ocasionalmente cerca de las costas. Su origen es tectónico con un régimen de esfuerzos extensivos (transtensión) y están también ligados a cuencas tipo Graben (pull-apart). La configuración geomorfológica que domina otros factores que afectan la dinámica de los lagos son esencialmente el tamaño y la forma junto con la geometría y el clima. El tamaño y la forma junto con parámetros morfométricos como área, volumen, profundidad, determinan la influencia de otros factores y procesos como la estratificación de masas de agua, corriente, desarrollo de vegetación. La sedimentación es de baja energía, las secuencias varvadas determinan los cambios estacionales anuales (verano-invierno). Las varvas son capas intercaladas de material detrítico y material orgánico que se depositan anualmente. Si son de color claro indican verano y el color oscuro indica temporada húmeda. El tamaño de grano va desde gravas a arcillas con predominio de limos y arcillas. Las arenas se encuentran hacia la zona donde se encuentra la fuente de agua del lago. En climas áridos se forman evaporitas las cuales comprenden bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y cloruros de Na y Ca. Las arcillas que se forman en climas áridos son montmorillonitas, las cuales están también asociadas a cuencas con rocas ferrosas y condiciones alcalinas. La caolinita se forma en climas húmedos, con mucho oxígeno y PH > 7 (CORRALES *et al.* 1977).

Abanicos Aluviales.

Los abanicos o conos aluviales son depósitos de detritos clásticos, que presentan formas característicamente cónicas. Este tipo de sistemas se desarrollan en las zonas adyacentes a las porciones que delimitan los escarpes de altos morfológicos, en donde el aporte de sedimentos es mucho mayor y las corrientes son confinadas a valles angostos que se tienen dentro de una cuenca adyacente. Son particularmente comunes en regiones áridas o semiáridas en donde la vegetación es escasa y el transporte de sedimentos ocurre esporádicamente pero con gran violencia durante las tormentas. (CORRALES *et al.* 1977)

En la zona de mayor pendiente, el cauce es generalmente recto, pero cuando emerge en la planicie, playa o en un valle más amplio, la corriente se divide en numerosos canales entrelazados y/o discontinuos. Los canales son más y más numerosos a medida que la pendiente se hace más suave. Parte del material forma barras en el medio de los canales y a medida que dichos canales se rellenan, los mismos migran lateralmente una corta distancia hacia otra posición. Vistos desde planta, los sedimentos de un abanico aluvial se presentan en forma cónica (AGUILAR & CARABALLO 2007).

Vistos en planta, los abanicos aluviales presentan formas cónicas, con un sistema bien desarrollado de ríos sinuosos sobre la superficie del abanico. El perfil longitudinal desde el origen hasta la porción terminal del abanico es comúnmente cóncavo hacia arriba; mientras que el perfil transversal es generalmente convexo hacia arriba. Desde el punto de vista morfológico, los sistemas de abanicos aluviales pueden ser divididos en tres unidades (figura 9.1).

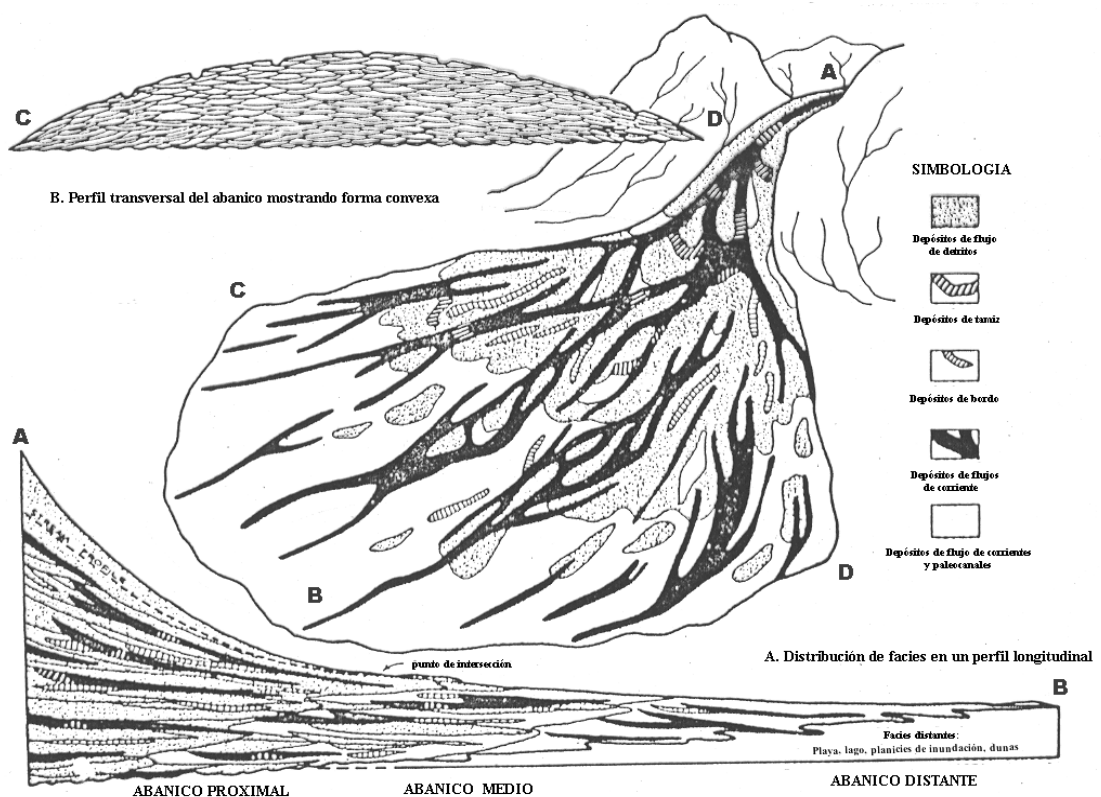


Figura 9.1. Unidades morfológicas de los abanicos aluviales. Se muestra también las características del perfil transversal (arriba) y longitudinal (abajo) al sistema. Tomado de CORRALES et al. 1977.

✓ **Abanico proximal.** Es la porción del sistema que se encuentra más cercana al alto morfológico, presenta los gradientes de inclinación más altos y los sedimentos que se depositan son principalmente los más gruesos.

✓ **Abanico medio.** En esta parte se tienen gradientes de inclinación menores en el talud y los canales tienden a ser mucho más someros que en el abanico proximal, dando como consecuencia que los sedimentos sean de tamaño intermedio.

✓ **Abanico distal.** También se le conoce como la base del abanico. Se distingue por presentar los gradientes de inclinación más bajos del sistema, una sedimentación muy fina y la ausencia de canales bien desarrollados. (CORRALES et al. 1977)

La composición de los abanicos se hace más compleja distal y lateralmente por la coalescencia de abanicos adyacentes y litológicamente diferentes, además de la mezcla con otros sedimentos en las llanuras aluviales. Los conglomerados y brechas contienen clastos de rocas del área fuente, sin embargo sus relativas cantidades serán inconsistentes en los depósitos del abanico. Los factores contribuyentes de estas diferencias incluyen la ubicación en el abanico y la meteorización de los distintos tipos de roca que produce cantidades variables de gravas, arenas, limos y arcillas (NILSEN 1982).

Composicionalmente NILSEN (1982) menciona que los sedimentos pueden ser cuarzosos, feldespáticos o líticos. La abundancia de fragmentos de rocas decrece hacia el abanico inferior (zona distal) como resultado de la meteorización durante el proceso, igualmente sucede con los ferromagnesianos.

2.6. LA FALLA DE BOCONÓ

La zona de la Falla de Boconó constituye una de los rasgos geotectónicos más importantes de la parte noroccidental de América del Sur. Esta falla se caracteriza morfológicamente por una alineación de valles y depresiones (cuencas en tracción), orientadas en dirección N45E aproximadamente y se extiende por más de 500 km, entre la Depresión de Táchira (al Sur de Cordero) y el Mar Caribe (área de Morón, edo. Carabobo, figura 10), atravesando oblicuamente los Andes de Mérida y cortando el extremo occidental de las montañas del Caribe (Cordillera de la Costa y Serranía del Interior). A lo largo de toda su extensión, se observan una o varias trazas activas denominadas Falla de Boconó, la cual se caracteriza por escarpes de fallas, canales fluviales desplazados, lagunas de falla, cuencas de tracción y otros rasgos geomorfológicos típicos de fallas rumbo deslizantes.

Según CASAS-SAINZ (1992), el sector norte de la Falla de Boconó (margen sur de la Placa Caribe) presenta una curvatura de 30°, y pasa de tener dirección NE – SW a E – W al unirse con el sistema de Morón–San Sebastián–El Pilar. Este sector de la falla forma el margen activo durante el Cuaternario de la Cuenca de Yaracuy. A partir de estudios fotogeológicos y de campo de este sector de la Falla de Boconó, se han observado dos segmentos con diferentes características:

a) Segmento Yaritagua-San Felipe (45 km de longitud) se ha comportado durante el Cuaternario como una falla inversa dextral, produciendo la sedimentación de cuatro niveles de abanicos aluviales compuestos principalmente de grava con cantos rodados de rocas metamórficas y matriz arenosa. Las estructuras sedimentarias presentes denotan un origen acuático, de ríos, al menos en su parte media y distal. Durante este periodo la actividad tectónica vertical disminuyó en relación a la tasa de sedimentación.

b) Segmento San Felipe–Golfo triste (55 km de longitud) donde el movimiento de la falla se aproxima progresivamente a la dirección E – W, es principalmente lateral derecho.

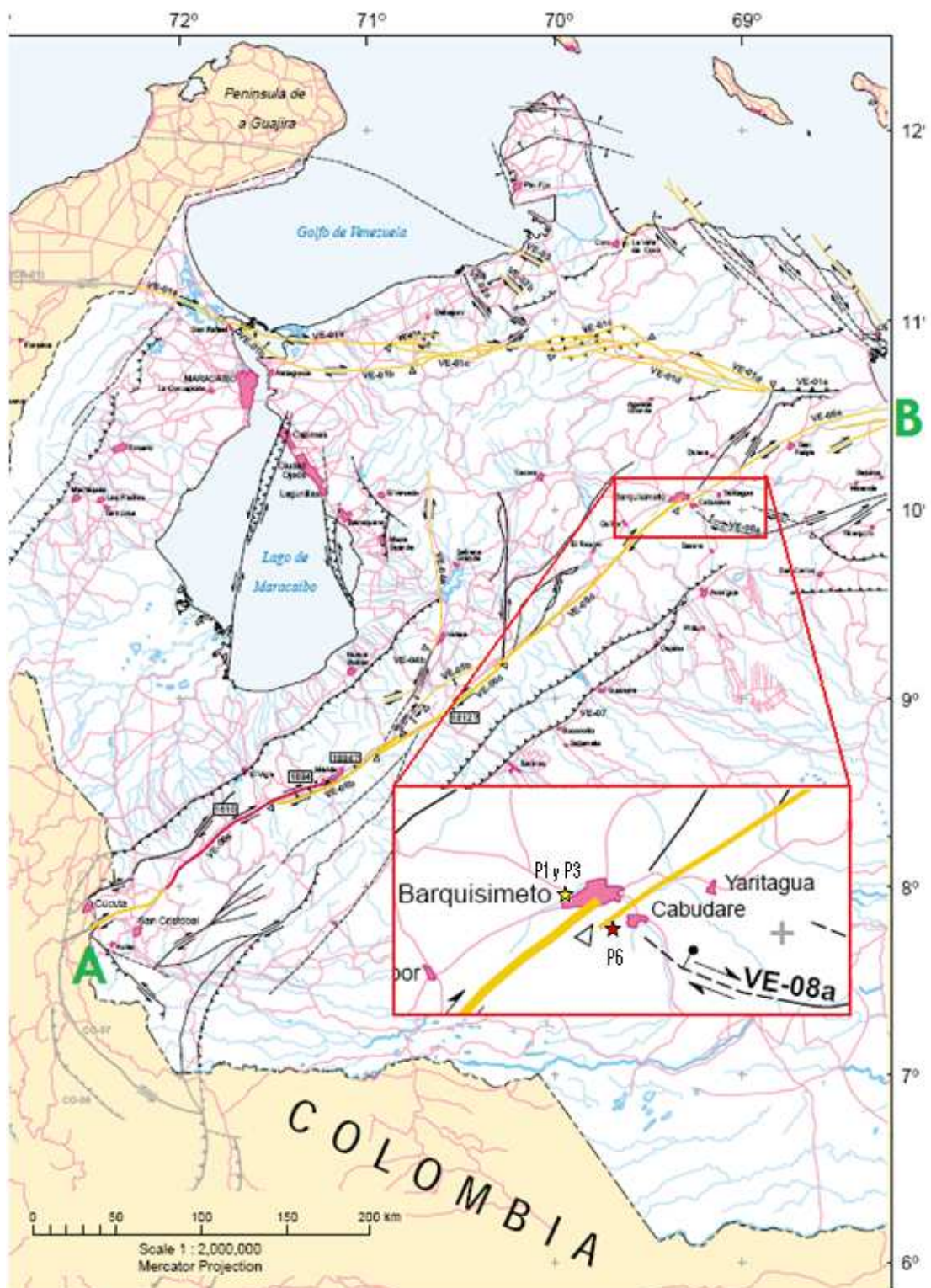


Figura 10. Ubicación geográfica de la Falla de Boconó (trayecto A-B), en rojo se encuentra resaltada el área de estudio. La estrella amarilla señala la ubicación de los pozos 1 y 3, mientras que la estrella roja señala la ubicación del pozo 6. Tomado de AUDEMARD et al. (2000)

Por lo tanto, esta parte norte de la falla de Boconó se comporta de manera distinta a la parte principal (sección que corta completamente los Andes venezolanos) que se ubica hacia el sur. Esto puede ser debido al comportamiento de las fallas en el sector sur del límite entre las placas Caribe y Suramericana, donde en los Andes venezolanos, la Falla de Boconó actúa como una falla rumbo deslizante y las fallas de Piedemonte actúan como inversas (SOULAS 1985).

La disposición general de los distintos niveles de abanicos aluviales a lo largo de la Falla de Boconó entre Yaritagua y San Felipe, se adapta al carácter dextral de la Falla de Boconó, por lo que se puede suponer que cada una de las grandes quebradas que desciende de la Sierra de Aroa han podido dar lugar a varios niveles de abanicos aluviales (CASAS-SAINZ & DIEDERIX 1992). Atribuyéndose entonces, estas características a los niveles cuaternarios que conforman la región de Barquisimeto y Cabudare, donde los agentes principales de transporte de sedimentos han sido el Río Turbio al sur de la ciudad, y la Quebrada La Ruezga en el límite norte de Barquisimeto. Esto último bajo el criterio de CASAS-SAINZ & DIEDERIX (1992), quienes mencionan que el movimiento secuencial de las fallas que limitan la Depresión de Yaracuy puede relacionarse a su vez, con el movimiento dextral de tres trazas del sistema de fallas de San Sebastián, de modo que el movimiento de aquellas está condicionado por el de estas últimas, ya que, puesto que las tres presentan orientaciones similares y afectan al mismo tipo de material, no deberían existir factores mecánicos que favorezcan el movimiento de una u otra (CASAS-SAINZ & DIEDERIX 1992).

Entre Sanare y San Felipe, GIRALDO (1985) describe sucesivamente a la Falla de Boconó en tres sectores:

a) Sector Sanare – Barquisimeto: La falla en esta región sigue una trayectoria muy rectilínea en más de 60 km siguiendo una dirección N45E. Se detectan varios ríos en su trayecto: las quebradas Corozal (Versalles), Acarigua (Sanare) y el Río Turbio entre San Miguel y Buena Vista. La Falla de Boconó atraviesa la región Sur de Barquisimeto, más precisamente la localidad de El Manzano. Se visualizan buenos afloramientos de cuaternario deformado en la vía que conduce hacia la población de Río Claro. La traza de esta falla proveniente de Loma El León continúa siguiendo la misma dirección para

desaparecer en el sector de Las Cuibitas; no obstante, al norte de ésta (1 km) hay una segunda traza, la cual comienza al Este del Río Turbio para seguir a lo largo de la quebrada Zanjón Agua Viva.

b) Sector de Cabudare: Este corresponde a una depresión considerada como una cuenca de tracción (pull-apart) de edad Plio–Cuaternaria desarrollada entre dos ramas de la Falla de Boconó. Su amplitud máxima es de 12 km, mientras que su longitud puede alcanzar 20 km. Sus límites norte y sur están definidos por fallas más o menos Este – Oeste.

c) Sector de Yaracuy: Este también es considerado como una cuenca de tracción (pull-apart) Plio–Cuaternario, desarrollado entre las fallas activas dextrales de Boconó y de Morón (SCHUBERT 1980). La serie sedimentaria cuaternaria aflora al pie de la sierra de Aroa, es decir, en la proximidad de la Falla de Boconó. El buzamiento general de los sedimentos se inclina hacia el SE, orientado el drenaje que desciende de esta sierra

Se estima que el desplazamiento a lo largo de la falla, en las cercanías de Barquisimeto, es por lo menos de 30 km; este desplazamiento es sugerido por la diferencia en el grado de metamorfismo observado en las rocas de los lados opuestos de la falla, y la magnitud del movimiento, por la distancia que hay entre las rocas de metamorfismo similar, en los lados opuestos desplazados a lo largo de la falla (BUSHMAN 1965).

ALBERDING (1957) menciona 45 km de desplazamiento a lo largo de la falla en Lara Suroriental, y cree que han ocurrido desplazamientos hasta de 65 km en la parte Suroccidental de la falla de los Andes venezolanos. Es bastante probable que la falla haya pasado por varios períodos de movimientos. En el área de Barquisimeto, el desplazamiento principal observado en la topografía presente, ha tenido lugar desde el Cretácico tardío, después del cual las rocas fueron regionalmente metamorfizadas. Las estrías presentes en el aluvión a lo largo de la zona estudiada comprueban el movimiento durante el Cuaternario y, el terremoto de 1950, indica que aún se están efectuando ajustes a lo largo de la falla (BUSHMAN 1965).

La mayor parte de las fallas que muestran movimiento vertical tiene el lado caído al norte; las diaclasas son abundantes y de orientación extremadamente variable. La foliación

es paralela a la estratificación en la mayoría de los casos. El plegamiento cruzado y el clivaje que corta los ejes de los pliegues en la parte noroccidental de la zona, sugieren que ha tenido más de un período de compresión (BUSHMAN 1965).

2.7. LA CUENCA DE TRACCIÓN DE CABUDARE

Las cuencas de tracción (Pull – Apart Basins), se forman en zonas de relevo o de solape entre dos ramales pertenecientes a un sistema de fallas transcurrentes o rumbo-deslizantes (“strike-slip faults”) por lo tanto, dichas cuencas pueden estar asociadas tanto a sistemas sinestrales como dextrales. Igualmente, las cuencas de tracción se pueden originar en zonas de curvaturas o de alivio (releasing bends) de una falla transcurrente (AUDEMARD & GIRALDO 1997). En Venezuela las cuencas de tracción han sido en su mayoría asociadas al sistema de fallas transcurrente dextral de Boconó–San Sebastián–El Pilar.

Para AUDEMARD & GIRALDO (1997), la cuenca de tracción de Cabudare, se define como el área situada entre dos ramales subparalelos de la Falla de Boconó de orientación aproximada NE – SW (figura 11); las mejores evidencias tectónicas cuaternarias se encuentran a lo largo de las carreteras que van de Barquisimeto a Rio Claro y de Cabudare a Fila El Palito. A nivel regional, el régimen imperante de esfuerzos es de carácter compresivo con una dirección aproximada NW – SE. Sin embargo a nivel de detalle, se pueden diferenciar un estilo transcurrente compresivo (afuera de la cuenca), y un estilo extensional dentro de la cuenca de tracción.

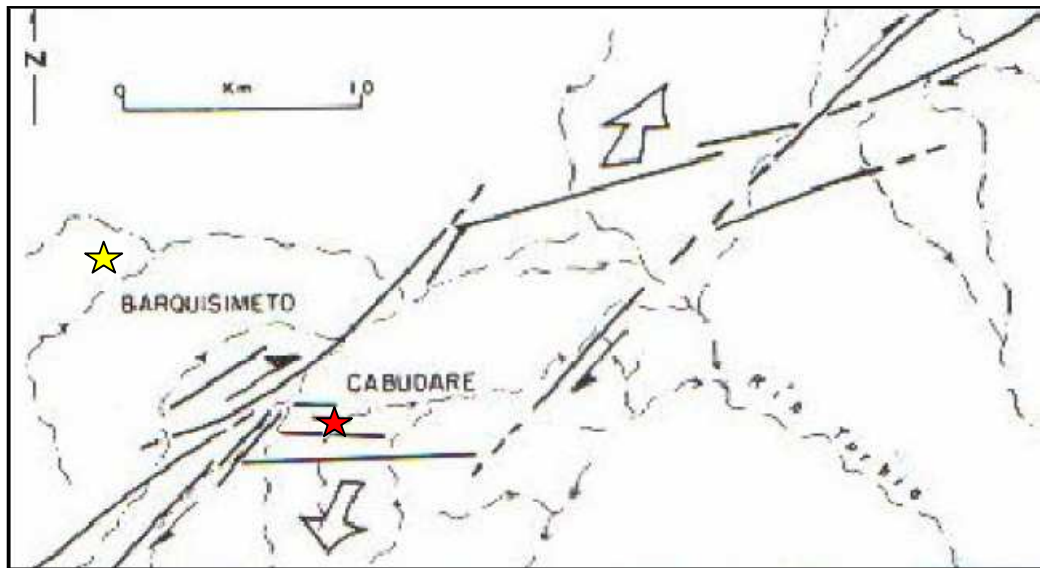


Figura 11. Sección esquemática de la cuenca de Cabudare. La estrella amarilla señala la ubicación de las perforaciones 1 y 3, mientras que la estrella roja señala la ubicación del pozo 6. Tomado de AUDEMARD & GIRALDO 1997

Desde el punto de vista hidrológico, este tipo de cuencas de tracción intramontana, presentan ciertas características resaltantes, como lo es el trazado anómalo de la red fluvial. Por ejemplo, el hecho más notorio en esta área, es que el Río Turbio, que viene drenando en sentido SW-NE, cuando llega a la depresión de Cabudare, cambia de curso hacia el sur y enfila hacia los altos Llanos de Cojedes en vez de continuar fluyendo hacia el Golfo Triste, a través de la Depresión de Yaracuy. De esta forma se puede afirmar, que el Río Turbio, perteneciente a la red hidrográfica del Río Orinoco, pudo haber drenado en tiempos geológicos recientes (< 5 M.a.) hacia el Mar Caribe, en el sector que hoy ocupa el Golfo Triste (AUDEMARD & GIRALDO 1997).

La Cuenca de Tracción de Cabudare está localizada al este de la ciudad de Barquisimeto, está rodeada esencialmente de rocas mesozoicas, pertenecientes al alóctono Caribe. Dicha depresión tiene unos 15 km de largo en dirección NE-SW, y puede alcanzar transversalmente los 10 km, siendo su relleno sedimentario de edad Plio-Pleistoceno e inclusive Holoceno. Las deformaciones tectónicas que afectan el relleno sedimentario de esta cuenca, indican un régimen distensivo, el cual es contemporáneo a las deformaciones compresivas detectadas en las afueras de dicha cuenca intramontana.

GIRALDO (1985) estudió en detalle las principales evidencias de deformaciones tectónicas asociadas al fallamiento de Boconó, y concluyó que fueron generadas durante la fase compresiva vigente durante el Plio-Pleistoceno (AUDEMARD & GIRALDO 1997).

En los alrededores de la localidad de Cabudare, se han cartografiado lineamientos tectónicos de orientaciones aproximadas este-oeste a norte-sur; algunos de ellos corresponden a fallas normales que afectan a las rampas detríticas del Pleistoceno temprano. En consecuencia, algunas de ellas pueden estar basculadas hacia el sur, lo cual es una inequívoca evidencia de movimientos tectónicos ocurridos durante el Cuaternario, ya que originalmente, dichas rampas tienen buzamiento suave hacia el norte (AUDEMARD & GIRALDO 1997).

3. BASES TEÓRICAS

En este capítulo se describirán brevemente los fundamentos teóricos de las técnicas analíticas y de procesamiento de datos. Sin embargo se remite al lector al Apéndice 2, donde se tratan estos temas de forma más extensa.

3.1. ESPECTROMETRÍA DE RAYOS GAMMA

La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son inestables, es decir que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que para alcanzar su estado fundamental deben perder energía. Lo hacen en forma de emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Los elementos naturales radiactivos son aquellos que poseen números atómicos (Z) entre 81 hasta 92, además de otros que se encuentran en la parte central de la tabla periódica.

Una sustancia radiactiva emite radiaciones de tres tipos:

1. Radiaciones corpusculares:

- Partículas alfa (α): cargadas positivamente, se desvían en un sentido.
- Partículas beta (β): cargadas negativamente, se desvían en otro sentido.

2. Radiaciones Electromagnéticas:

- Rayos gamma (γ): sin carga, no sufren ninguna desviación.

Debido a que los rayos gamma (γ), son mucho más penetrantes que los rayos alfa (α) y beta (β) y no son completamente absorbidos por una placa de aluminio, sino cuando el espesor del de esta alcanza varios centímetros, estos son usados comúnmente en la prospección radiométrica. La espectrometría se basa en las mediciones de la energía de las partículas cargadas y los cuantos gamma (γ), método que nos permite determinar la presencia de los elementos radiactivos más importantes por las diferencias existentes entre los espectros energéticos de la radiación emitida por cada uno de ellos. Cada uno de estos elementos posee una ventana de valores característicos de energía de los cuantos γ lo que

permite identificar la presencia de un elemento dado a partir de la emisión de cuantos γ con energías similares.

La determinación de estas radiaciones gamma emitidas por los isótopos radiactivos tiene diversas aplicaciones dentro de las geociencias entre las cuales podemos mencionar:

- Prospección y búsqueda de yacimientos de minerales radiactivos.
- Herramienta auxiliar en el cartografiado de unidades estratigráficas.
- Prospección de minerales no radiactivos que estén íntimamente asociados con minerales radiactivos.
- Determinación litológica indirecta en pozos para petróleo y agua.
- Identificación de superficies de inundación, discordancias, hiatos, horizontes guías y como una herramienta de identificación preliminar de ambientes sedimentarios en el subsuelo a través de registros continuos de rayos gamma (SERRANO 2003).

3.2. FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica para cada elemento químico. Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis FRX es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía.

Los espectros muestran los resultados en forma de información cualitativa, donde los elementos en una muestra han sido detectados mediante el reconocimiento de los rangos de energía emitidos. La conversión de las intensidades mostradas por cada elemento, a alguna

medida de concentración, es la base de los análisis cuantitativos para los que son necesarios la calibración o comparación de las intensidades de las muestras a ser analizadas, con intensidades de muestras patrones o estándar, siendo necesario que ambos tipos muestren composición química y física similar (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

La fluorescencia de rayos X (FRX) es comúnmente la técnica analítica más usada en la determinación de elementos químicos mayoritarios y traza en muestras de rocas. Es una técnica sumamente versátil y puede analizar cerca de 80 elementos en un amplio rango de sensibilidad, detectando concentraciones en porcentaje y partes por millón.

3.3. COLOR MUNSELL

El color del suelo es una de las características morfológicas más importantes, es la más obvia y fácil de determinar, permite identificar distintas clases de suelos, es el atributo más relevante utilizado en la separación de horizontes y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos de este recurso.

El sistema de clasificación de colores de Munsell describe todos los posibles colores en términos de tres coordenadas: matiz (Hue) que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; claridad (Value), el cual indica la luminosidad o oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro; y pureza (Chroma), que indica el grado de saturación del gris neutro por el color del espectro.

3.4. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La geoquímica está relacionada con las leyes que gobiernan la distribución de los elementos químicos en la Tierra. Es la ciencia que estudia en forma cualitativa y cuantitativa las geósferas internas (núcleo, manto) y externas (litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera) que forman la Tierra, y las leyes que controlan la distribución de los elementos químicos y sus isótopos en cada una de estas partes y entre ellas. Cada tipo de

roca, desde distintos puntos de vista, se puede considerar como un sistema químico en el cual distintos agentes pueden producir cambios químicos.

A partir de los años 80 avances significativos en la geoquímica analítica, permitieron por primera vez la adquisición rápida y a menor costo de un conjunto de datos de alta calidad, lo que ha resultado en un cambio de actitud respecto al significado de la composición química y desarrollándose un profundo interés en la geoquímica de rocas sedimentarias. Estos avances analíticos impulsaron el desarrollo de la geoquímica como una herramienta poderosa de caracterización y correlación de estratos a partir del uso de datos inorgánicos y en base a variaciones geoquímicas en la secuencia estratigráfica. Esto último es conocido actualmente como quimioestratigrafía y permite dividir una secuencia estratigráfica en distintas unidades con comportamientos geoquímicos diagnósticos, denominadas quimiofacies.

Algunas de estas herramientas desarrolladas para este tipo de análisis permiten la obtención de los siguientes datos geoquímicos:

- **Componentes mayoritarios:** son los componentes predominantes en la roca, expresadas como óxidos, a saber SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5 , los cuales en general presentan concentraciones $> 0,1\%$.
- **Elementos traza:** son los elementos menos abundantes en la roca y sus concentraciones se expresan en ppm o ppb y son $< 0,1\%$. De este tipo disponemos de la concentración del vanadio.
- **Isótopos radiactivos:** incluyen aquellos elementos o isótopos cuyo decaimiento espontáneo se debe a su radiactividad natural, que en el caso particular de U y Th se produce una serie de cambios que generan otro grupo de elementos químicos.

Para una mejor comprensión y análisis de la respuesta geoquímica de las rocas es necesario tratar los datos geoquímicos por medio de gráficos exploratorios y de diversas técnicas estadísticas, univariantes y multivariantes. Uno de los beneficios estadísticos más importantes es la obtención de perfiles, los cuales permiten visualizar de mejor manera el comportamiento de una sección en cuanto a composición de elementos mayoritarios y

elementos traza, relaciones entre elementos, y/o concentraciones de isótopos radiactivos, facilitando a su vez la definición de unidades o *quimiofacies* con características químicas y radiométricas específicas, la comparación entre perfiles de distintas secciones y el establecimiento de posibles correlaciones (CHACÍN 2003).

Los eventos geoquímicos que definen el patrón de los perfiles, pueden reflejarse como máximos, mínimos y deflexiones de las curvas, los cuales a su vez definen los marcadores geoquímicos de primer y segundo orden. Los marcadores de primer orden representan eventos geoquímicos caracterizados por más de un elemento o por una deflexión excepcional de las curvas. Los marcadores de segundo orden se definen a partir de un solo elemento o por fluctuaciones elementales menos significativas (JORGENSEN 1986). Entonces se define quimiofacies como inflexiones importantes y comunes en varios perfiles que pueden estar indicando el límite entre dos quimiofacies a las cuales debe dárseles una correcta interpretación.

3.5. GEOESTADÍSTICA

La aplicación de técnicas estadísticas y el proceso de interpretación de esta información para la resolución de un problema geológico se conoce con el nombre de geoestadística. Para el desarrollo del presente trabajo especial de grado se utilizó la estadística univariante y la multivariante, a continuación se presentarán los conceptos básicos más importantes de cada una.

Estadística univariante:

1. **Diagramas de cajas:** Cuando un grupo de datos es analizado existe la necesidad de conocer el centro y dispersión de los valores con respecto al valor central, así como de la existencia de valores extremos (conocidos como anómalos), o de estudiar la distribución de los valores a lo largo del eje de medida. Los diagramas de cajas son utilizados para examinar la distribución de una variable, su centro, su dispersión y sus anómalos.

2. **Gráficos de dispersión:** Corresponden a gráficos de dos variables permitiendo relaciones lineales entre ellas. En estos diagramas cada dato es representado por un punto que indica una sola unidad de observación sobre la cual se han hecho dos mediciones distintas, una para cada variable, representadas en cada uno de los ejes X y Y.

Estadística multivariante:

1. **Análisis de agrupaciones:** Constituye una de las técnicas de clasificación estadística que ordenan o clasifican un conjunto de objetos u observaciones, en diversos grupos en base a las similitudes internas de las mismas. Supóngase que se tiene una colección de objetos los cuales deben ser ordenados por clasificación jerárquica. Si se tienen n objetos y se han medido m características, el grupo de datos conforma una matriz $n \times m$. Posteriormente, pueden ser realizada algunas medidas de la similitud entre cada par de objetos.

2. **Funciones discriminantes:** Este método radica en encontrar una combinación lineal de las variables, las cuales produzcan las máximas diferencias entre los diferentes grupos de muestras (DAVIS 1973). El proceso de clasificación asociado al de discriminación, consiste en separar las muestras en grupos relativamente homogéneos y siendo distintos de otros grupos, sobre la base de las variables medidas. Existen pues, varias diferencias obvias entre el proceso de clasificación y el proceso de discriminación: la clasificación tiene una base interna, es decir, no depende de un conocimiento previo acerca de las relaciones entre los grupos como en las funciones discriminantes (DAVIS 1973).

Prueba Z

Si un número grande de muestras aleatorias e independientes de dos poblaciones normales es seleccionada, la distribución de la diferencias entre las medias de ambas también es normal. Basado en este concepto surge la prueba de hipótesis estadística Z, teniendo como condiciones de aplicación que las variables sigan una distribución normal y/o que el tamaño de las muestras sea igual o superior a 30. El uso y formulación correcta

de esta prueba de hipótesis, le permiten al investigador poner a prueba aspectos de la realidad, disminuyendo la distorsión que pudieran producir sus propios deseos o gustos.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Para este Trabajo Especial de Grado se utilizaran 359 muestras de pozos geofísicos y 32 muestras SPT, las cuales fueron recolectadas por la empresa GISCA entre marzo y junio de 2006, para FUNVISIS en el marco del Proyecto de Microzonificación del Riego Sísmico de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare. Para este trabajo especial de grado se utilizaran muestras extraídas de tres pozos diferentes (Tabla 3).

Tabla 3. Ubicación y cantidad de muestras usadas en el presente trabajo especial de grado.

Ubicación	Tipo de Perforación	Nomenclatura	Profundidad final (m)	Numero de muestras recolectadas
Barquisimeto	Pozo geofísico	P-3	105	73
	SPT	P-1	91,5	32
Cabudare	Pozo geofísico	P-6	300	286

El trabajo se dividió en tres etapas fundamentales, fase de preparación de muestras, fase de laboratorio y fase de procesamiento de datos. A continuación se describirá de forma resumida cada una, sin embargo en el Apéndice 3, se discute ampliamente las metodologías y materiales usadas en cada fase. Finalmente en la sección 4.4 se discute la metodología empleada para la definición de las unidades químico – radiométricas generadas en el presente trabajo.

4.1. FASE DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras fueron secadas al aire libre durante 60 días. Posteriormente usando una balanza electrónica se selecciona una fracción de 200 gr separadas en dos bolsas diferentes, una de 170 gr y otra de 30 gr. De la muestra de 30 gr, se selecciono la mitad, la cual fue disgregada o pulverizada utilizando un mortero y un mazo de cerámica. Las muestras una vez disgregadas, fueron guardadas en pequeñas bolsas plásticas tipo clip, debidamente rotuladas. Después de tener las muestras pulverizadas, se procedió a

prepararlas en unos portamuestras de plástico. Estas muestras serán utilizadas para la determinación de los componentes mayoritarios por fluorescencia de rayos X.

4.2. FASE DE LABORATORIO

Esta fase consistió en la determinación de las características químicas, radiométricas y de color de las muestras utilizando diferentes equipos.

4.2.1. ESPECTROMETRÍA DE RAYOS GAMMA: El análisis radiométrico se realizó con el sistema de espectrometría de rayos gamma Amptek MCA8000A "POCKET MCA", usando 200 gr de muestra y 1500 segundos de tiempo de medición según lo propuesto por SOLÓRZANO (2007). Las ventanas de medición usadas son las siguientes: F1, ^{214}Bi , ^{212}Bi , F2, ^{214}Bi , F3, ^{40}K , F4, ^{214}Bi , F5, ^{208}Tl .

4.2.2. FLUORESCENCIA DE RAYOS X: El equipo utilizado fue un espectrómetro de rayos X Philips, Minipal PW4025, y se determinaron los siguientes componentes: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O en porcentaje (%) y V en partes por millón (ppm).

4.2.3. COLOR MUNSELL: Las muestras pulverizadas son comparadas con la tabla de colores Munsell la cual está compuesta de hojas, representando cada una de ellas un matiz (Hue) específico que aparece en la parte superior derecha de dicha página. Cada hoja presenta una serie de plaquitas o "chips" diferentemente coloreados y sistemáticamente arreglados en la hoja, que representan la claridad (Value) y la pureza (Chroma).

4.3. FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez obtenidos los datos, los mismos fueron procesados mediante las técnicas estadísticas univariante (diagramas de caja), bivariante (diagramas de dispersión) y multivariante (análisis de agrupaciones y funciones discriminantes). MVSP, STATGRAPHICS 5.1, y Microsoft EXCEL 2008 fueron los programas utilizados en la realización de estos análisis. Adicionalmente al análisis estadístico, se construyeron perfiles de distribución que muestran de forma gráfica la variación en las

concentraciones de los componentes químicos en los pozos. A partir del estudio de estas curvas es posible hacer interpretaciones sobre la variación de los componentes, así como también la definición de las unidades químicas que caracterizan cada sección. El análisis de agrupaciones se realiza mediante la elaboración de dendrogramas los cuales fueron generados combinando las variables a través del método del “vecino más lejano” y el criterio de las distancias euclidianas, manteniendo el orden estratigráfico de las muestras.

4.4. DEFINICIÓN DE UNIDADES QUÍMICAS-RADIOMÉTRICAS

Para definir una unidad sedimentaria es necesario establecer ciertos criterios que permitan en una sección estratigráfica diferenciar y reconocer intervalos con características químicas y/o radiométricas distintivas. Las unidades establecidas en los perfiles químicos y radiométricos fueron definidas siguiendo la metodología que a continuación se presenta:

1. Mediante el análisis de agrupaciones se definieron las unidades “provisionales” (químicas y/o radiométricas), manteniendo el orden estratigráfico de las muestras en los pozos estudiados.

2. Luego de establecidos los límites a través del análisis anterior, se procedió a evaluar el porcentaje de muestras correctamente clasificadas mediante el análisis de funciones discriminantes.

3. Posterior a esto, los límites de las unidades fueron redefinidos en los casos necesarios mediante la observación de los perfiles de abundancia químicos y radiométricos. Estos límites corresponden a marcadores de primer orden y son definidos en base a los siguientes criterios:

- Se considera un marcador, de 1er orden, aquel caracterizado por un valor máximo o un mínimo presente en 4 o más variables, mientras que los definidos por una sola variable son definidos como 2do orden.

- Dicho valor máximo o mínimo debe representar la culminación de una tendencia bien sea de ascenso o de descenso de una variable química o radiométrica.

4. Una vez establecidos los marcadores quimioestratigráficos se procedió a establecer las unidades químicas-radiométricas bajo el siguiente criterio: Una unidad estará comprendida entre dos marcadores, o bien entre un marcador y la base o el tope la sección.

5. Finalmente, dado que los análisis de agrupaciones revelan asociaciones y estructuras en la data, cuando no sean evidentes aparentemente, en este trabajo constituyen la herramienta de mayor peso para la definición de unidades, por lo tanto tendrán más prioridad los límites y unidades definidas en base a esta herramienta que las establecidas por los perfiles de abundancia químicos y/o radiométricos. Sin embargo, es importante destacar que las unidades y los límites de las mismas fueron coherentes con los límites definidos únicamente usando los perfiles de distribución.

6. Adicionalmente a las variables químicas, radiométricas y de color Munsell, se considera necesario el uso de las relaciones $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{CaO})$, $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, así como la radioactividad natural total de las muestras (γ_{total}), con la finalidad de describir mejor las unidades y sus posibles relaciones.

5. RESULTADOS

Las 391 muestras fueron analizadas por espectrometría de rayos gamma y por fluorescencia de rayos X, a continuación se muestran en forma resumida y usando parámetros estadísticos los resultados de dichos análisis (tablas 4 y 5 respectivamente). Los resultados químicos, radiométricos y de color Munsell completos pueden ser encontrados en el Apéndice 1 (tablas A1 a A9)

Tabla 4. Resumen de la espectrometría de rayos gamma multicanal en cuentas por segundo (cps). “n” representa el numero de muestras de cada pozo (Resumen de la tabla A1, A2 y A3, Apéndice 1).

Pozo	Parámetro Estadístico	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
Pozo 3 (n=73)	Promedio	1,12	0,962	0,985	1,45	0,706	0,537	0,447	0,323	0,306	0,420	0,173
	Máximo	1,28	1,18	1,12	1,66	0,961	0,610	0,509	0,391	0,395	0,467	0,200
	Mínimo	1,00	0,849	0,831	1,28	0,595	0,483	0,406	0,256	0,233	0,210	0,000
	Desviación estándar	0,065	0,064	0,063	0,072	0,073	0,027	0,023	0,027	0,038	0,033	0,024
Pozo 1 (n= 32)	Promedio	1,15	0,995	0,970	1,51	0,689	0,534	0,453	0,335	0,284	0,428	0,179
	Máximo	1,37	1,17	1,12	1,72	0,797	0,599	0,530	0,426	0,351	0,494	0,204
	Mínimo	0,957	0,848	0,763	1,31	0,571	0,451	0,390	0,263	0,219	0,353	0,147
	Desviación estándar	0,115	0,090	0,098	0,108	0,065	0,043	0,035	0,048	0,030	0,035	0,017
Pozo 6 (n=286)	Promedio	1,19	1,00	1,02	1,54	0,743	0,573	0,463	0,362	0,360	0,435	0,187
	Máximo	1,44	1,27	1,21	1,78	1,09	0,697	0,543	0,507	0,463	0,507	0,237
	Mínimo	0,961	0,837	0,675	1,34	0,586	0,439	0,384	0,251	0,229	0,368	0,145
	Desviación estándar	0,117	0,090	0,094	0,104	0,094	0,051	0,035	0,061	0,038	0,030	0,016

Tabla 5. Resumen de la composición química, obtenida por componentes mayoritarios en porcentaje (%) y Vanadio (ppm) (Resumen de la Tabla A4, A5 y A6, del Apéndice 1).

Pozo	Parámetro Estadístico	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	V
Pozo 3 (n=73)	Promedio	70,9	0,222	11,32	3,95	0,044	2,60	<1	0,684	127
	Máximo	79,1	0,454	14,86	5,26	0,130	19,0	-	1,15	223
	Mínimo	56,5	<0,01	8,11	2,33	0,020	0,476	-	0,278	< 20
	Desviación estándar	4,16	0,107	1,47	0,732	0,020	3,50	-	0,229	49,0
Pozo 1 (n= 32)	Promedio	67,3	0,351	11,7	4,17	0,035	4,55	<1	0,902	153
	Máximo	85,6	0,688	17,2	9,79	0,107	37,1	-	2,16	292
	Mínimo	38,0	<0,01	4,31	0,297	<0,01	0,286	-	<0,01	<20
	Desviación estándar	9,58	0,259	4,26	2,12	0,021	7,73	-	0,615	97,3
Pozo 6 (n=286)	Promedio	47,1	0,407	14,1	3,91	0,024	21,4	-	1,68	54,2
	Máximo	62,2	0,814	19,9	5,29	0,044	34,0	1,98	3,14	151
	Mínimo	34,3	<0,01	6,01	2,04	0,010	11,1	<1	0,355	<20
	Desviación estándar	4,72	0,236	3,29	0,731	0,006	4,26	-	0,776	29,7

Adicionalmente se muestran los perfiles de distribución de las variables químicas, radiométricas y de color Munsell obtenidos en los pozos 1, 3 y 6 (figuras 12, 13 y 14).

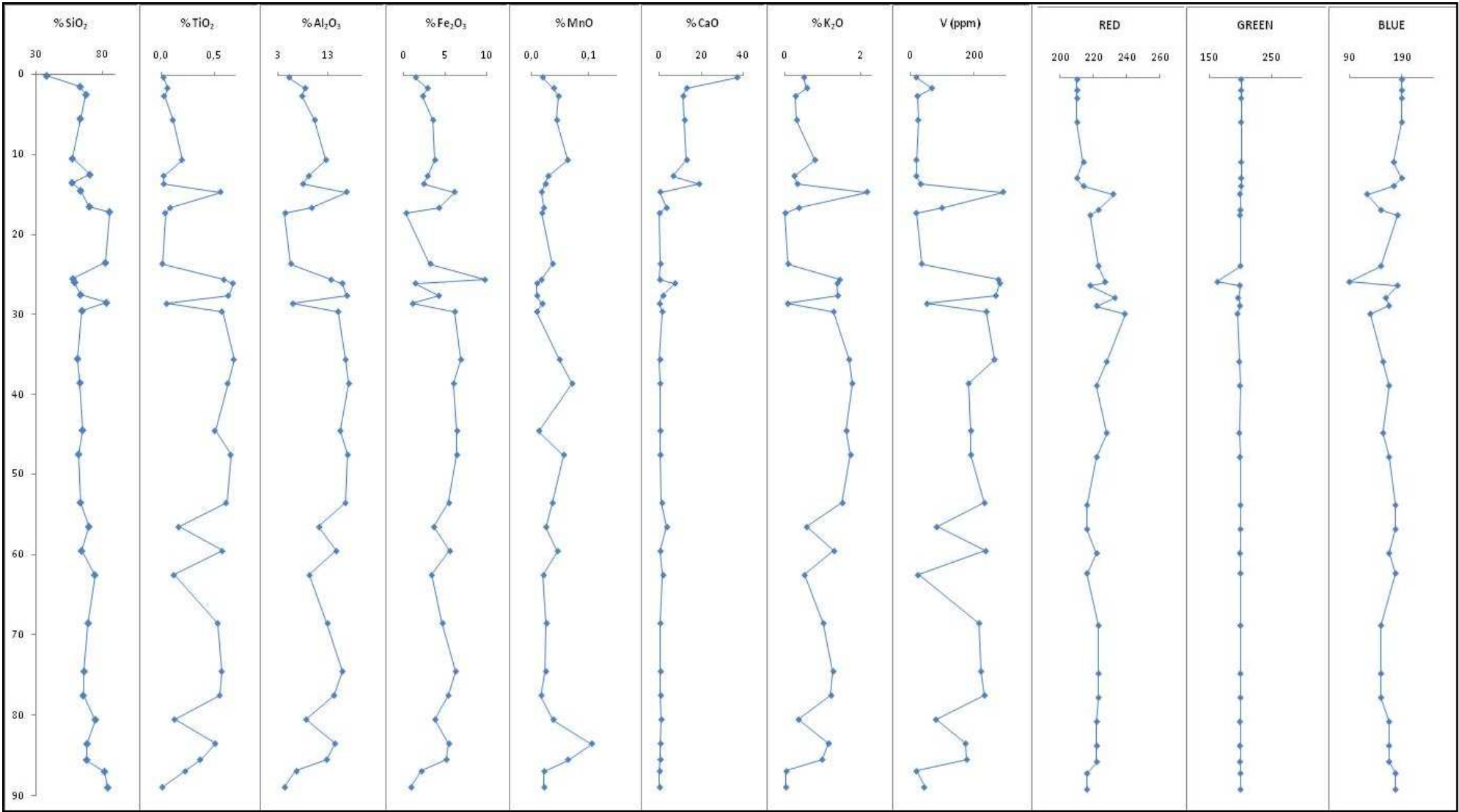


Figura 12.1. Perfil de distribución de las variables químicas, y de color Munsell en el pozo 1.

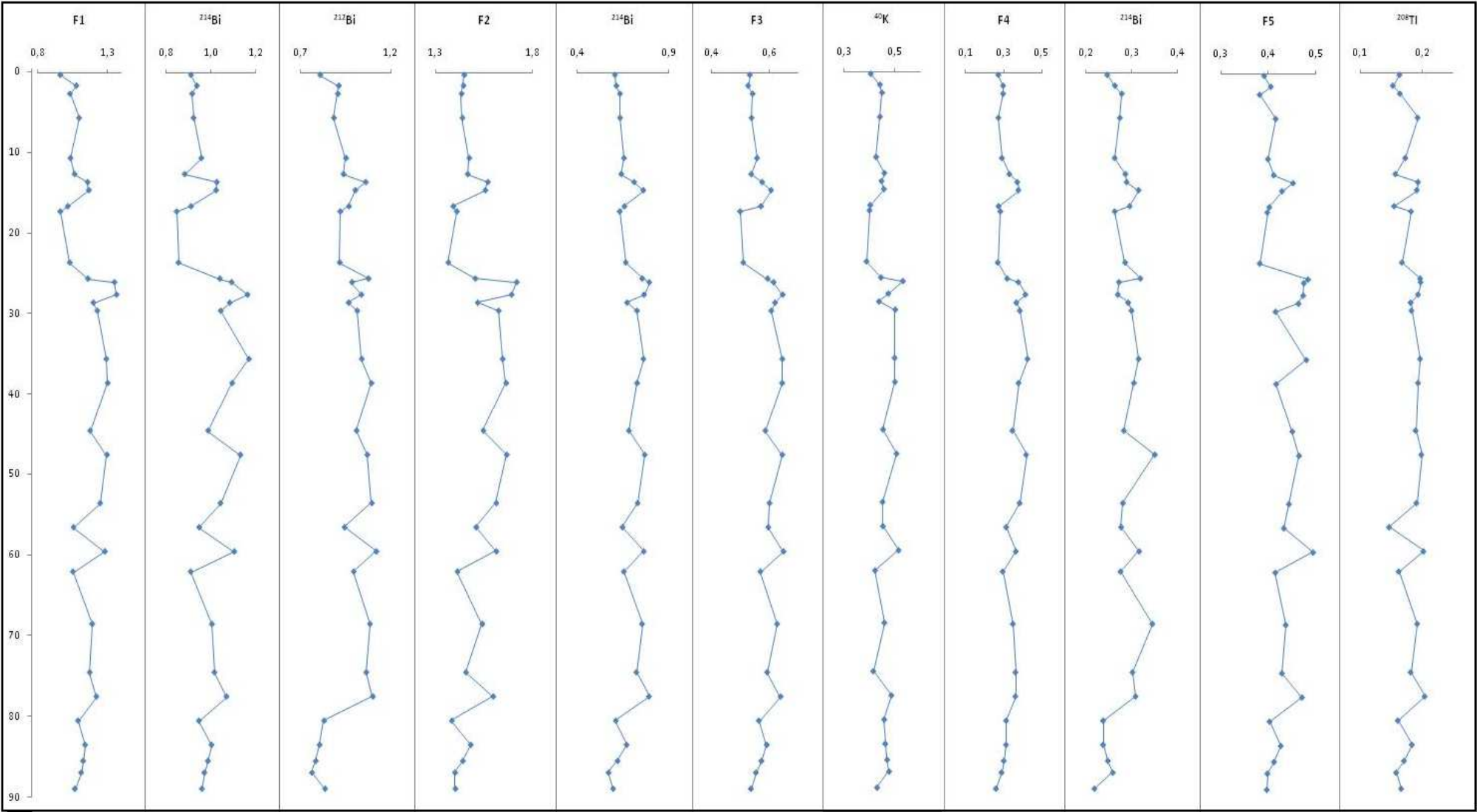


Figura 12.2. Perfil de distribución de las variables radiométricas en el pozo 1.

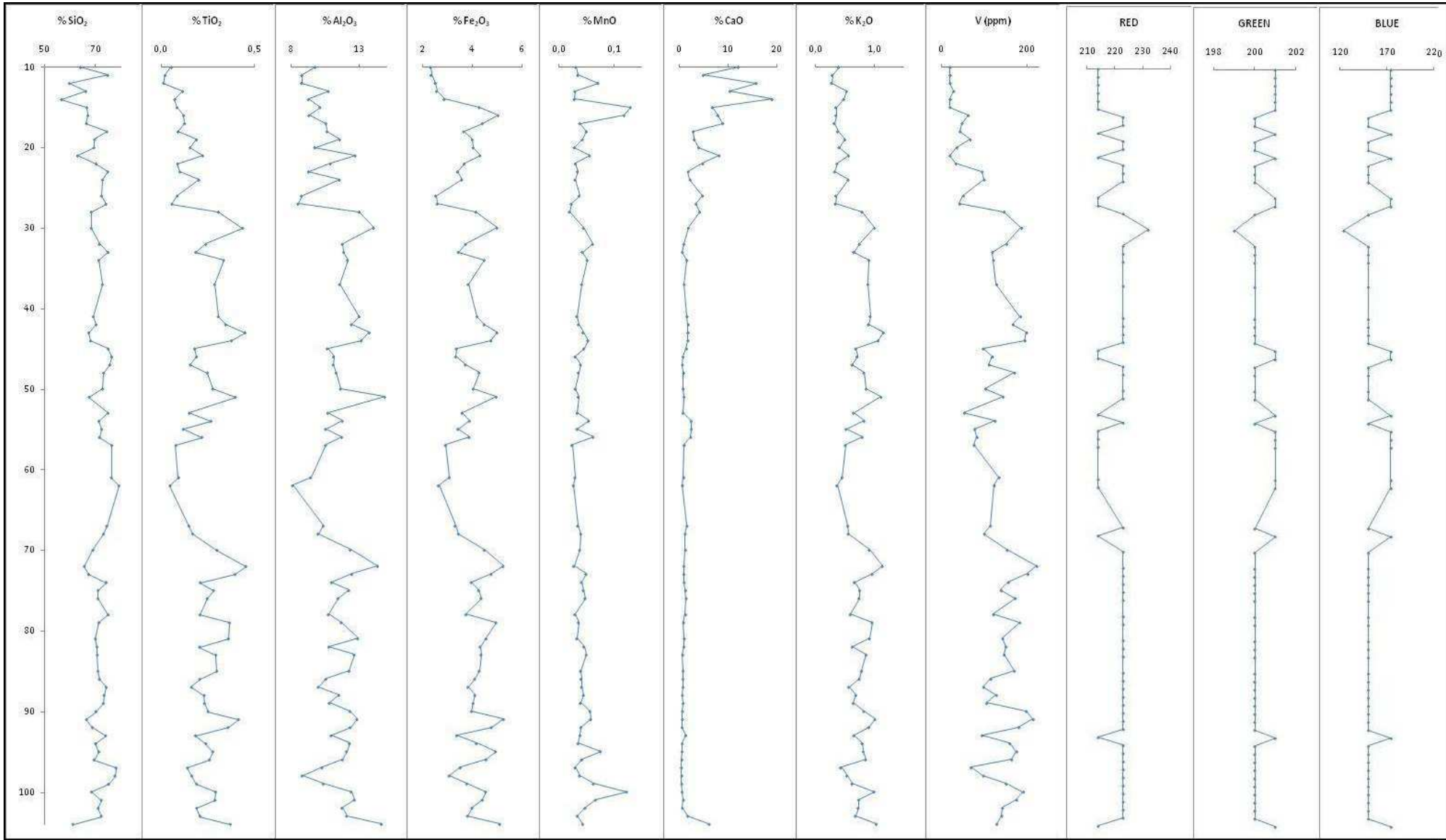


Figura 13.1 Perfil de distribución de las variables químicas y de color Munsell en el pozo3.

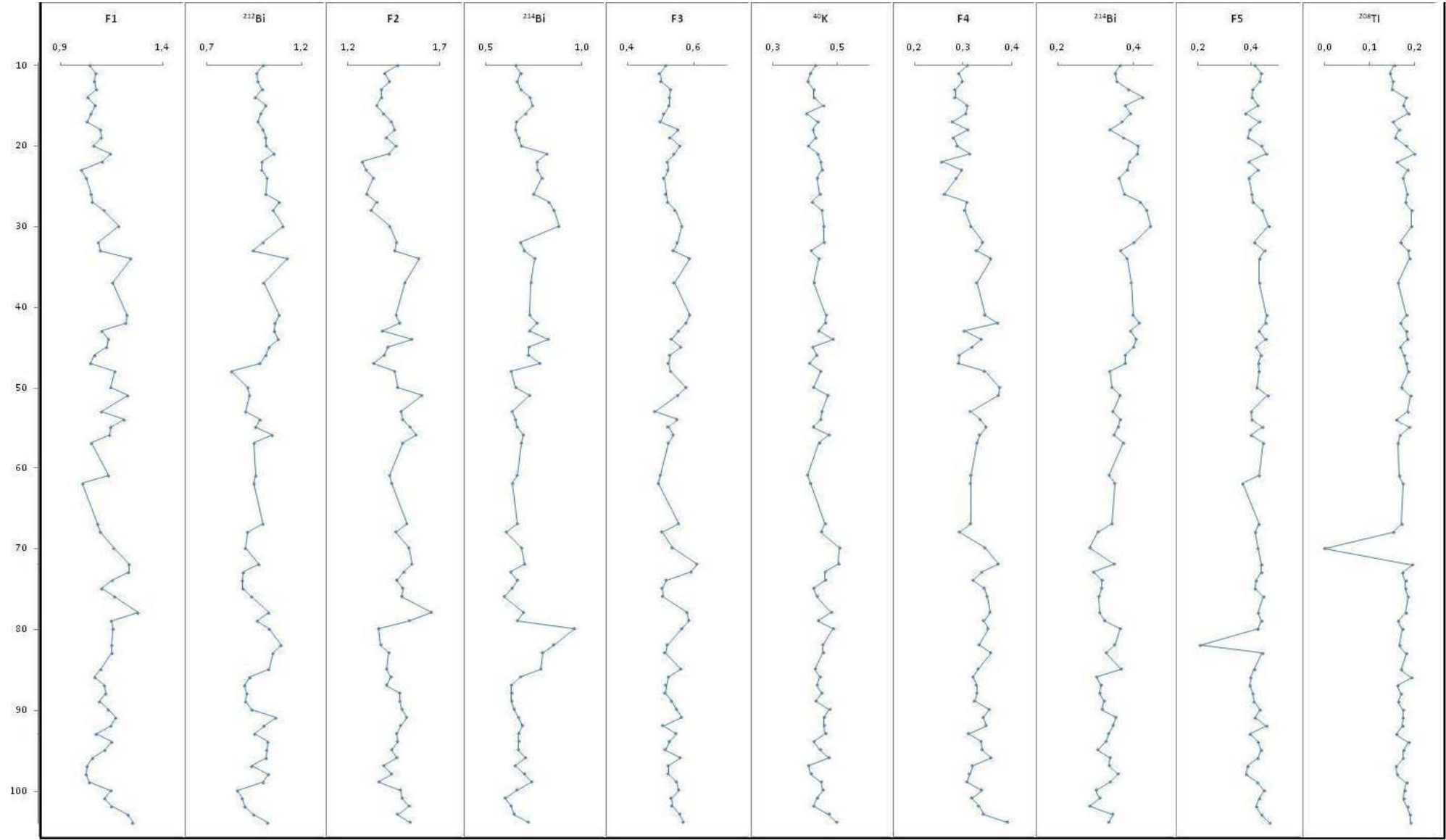


Figura 13.2. Perfil de distribución de las variables radiométricas del pozo 3.

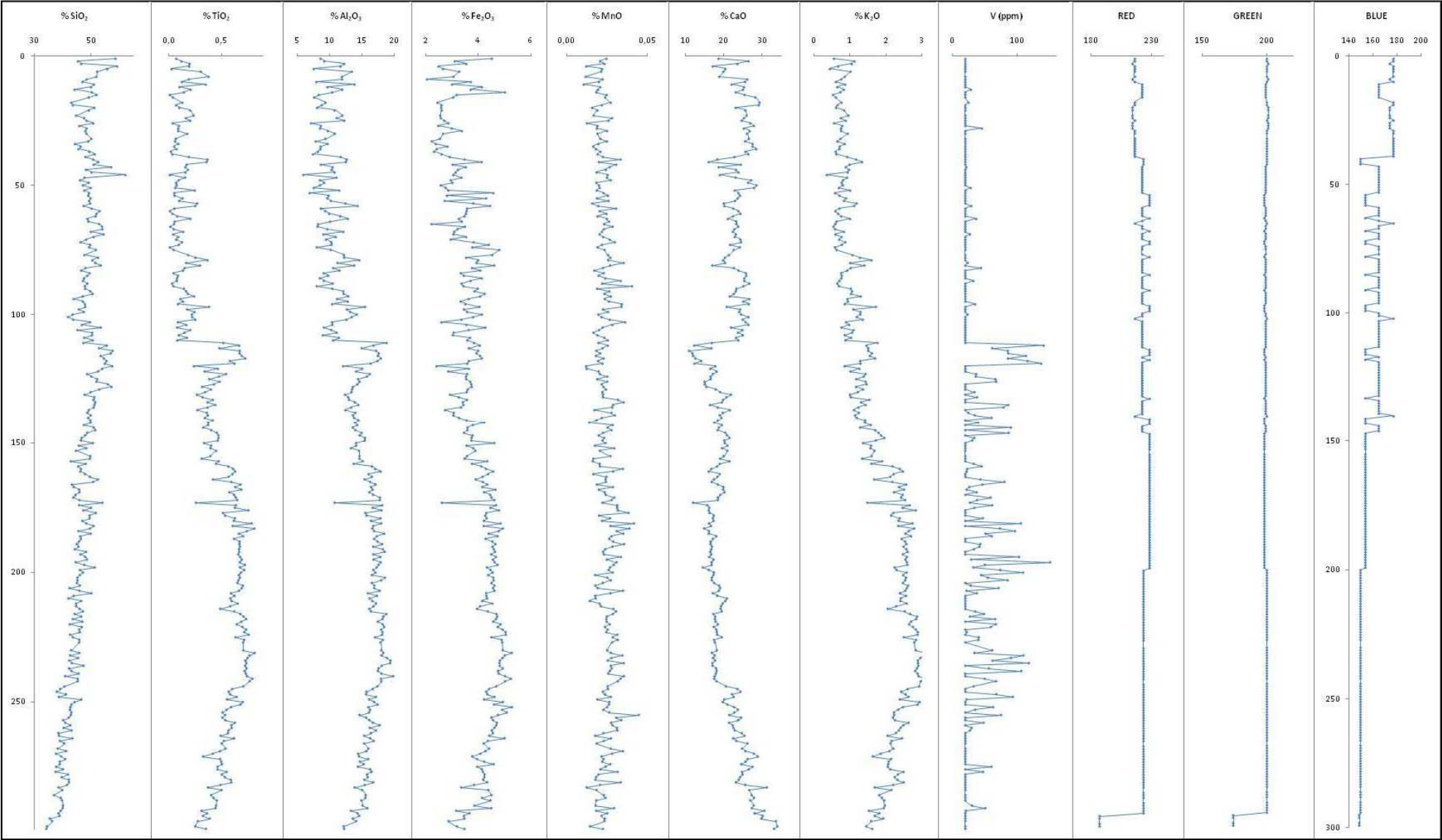


Figura 14.1. Perfil de distribución de las variables químicas, y de color Munsell en el pozo 6.

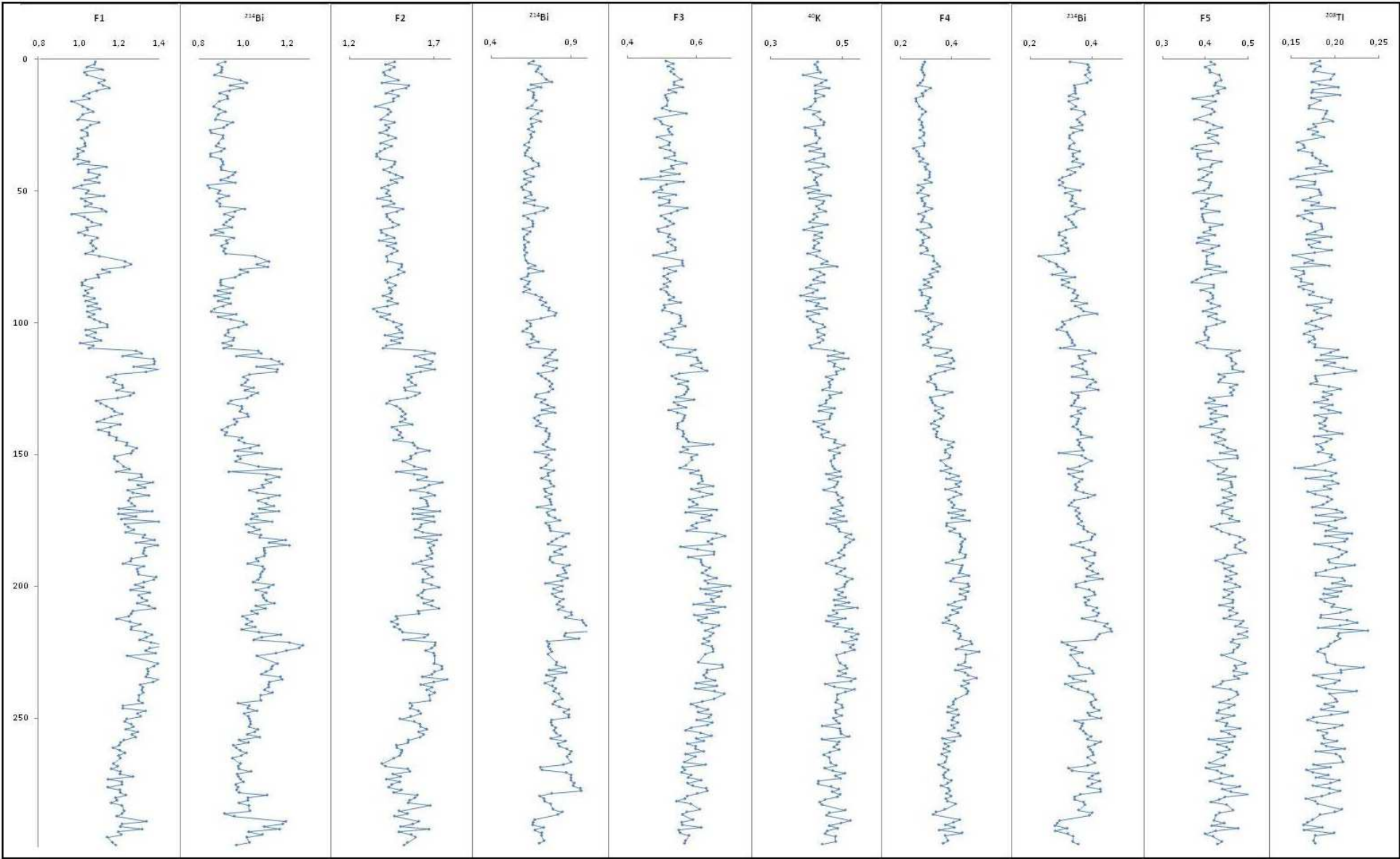


Figura 14.1. Perfil de distribución de las variables radiométricas en el pozo 6.

6. PROCESAMIENTO DE DATOS

En esta etapa, los datos obtenidos por medio de la fluorescencia de rayos X y la espectrometría de rayos gamma multicanal, serán analizados por medio de la estadística univariante y multivariante.

6.1. ESTADÍSTICA UNIVARIANTE

A continuación se muestran las tablas 6, 7 y 8 contentivas de los coeficientes de correlación lineal para los pozos 1, 3 y 6 respectivamente. Es importante señalar que en las tablas están resaltados los valores de coeficientes de correlación significativos con un 99% de confiabilidad para una población de 32, 73 y 286 muestras con dos variables, respectivamente. El valor crítico fue calculado según la tabla A13 (CROW 1960) del Apéndice 2, por tanto cualquier valor absoluto de coeficiente de correlación mayor o igual a ese será significativo en cada caso, para $\alpha=0,01$. El signo (–) representa una relación inversa entre las variables.

Tabla 6. Coeficientes de correlación “ R^2 ” para las variables químicas del pozo 1. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico 0,437, para 32 muestras ($\alpha=0,01$).

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	V (ppm)
SiO ₂								
TiO ₂	-0,116							
Al ₂ O ₃	-0,190	0,862						
Fe ₂ O ₃	-0,119	0,543	0,597					
MnO	-0,005	0,009	0,037	0,044				
CaO	-0,423	-0,193	-0,128	-0,161	-0,002			
K ₂ O	-0,251	0,848	0,885	0,608	0,016	-0,080		
V (ppm)	-0,103	0,884	0,754	0,526	-0,004	-0,193	0,797	

Tabla 7. Coeficientes de correlación " R^2 " para las variables químicas del pozo 3. Coeficiente de. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico de 0,296 para 73 muestras de 0,296 ($\alpha=0,01$).

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	V (ppm)
SiO ₂								
TiO ₂	-0,062							
Al ₂ O ₃	-0,118	0,797						
Fe ₂ O ₃	-0,101	0,707	0,603					
MnO	-0,065	0,001	0,002	0,106				
CaO	-0,490	-0,193	-0,103	-0,123	0,010			
K ₂ O	-0,046	0,899	0,767	0,547	0,001	-0,205		
V (ppm)	0,003	0,664	0,448	0,442	0,002	-0,406	0,682	

Tabla 8. Coeficientes de correlación " R^2 " para las variables químicas del pozo 6. Resaltadas en amarillo se encuentran los valores mayores al coeficiente de correlación crítico de 0,153 para 286 muestras ($\alpha=0,01$).

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	V (ppm)
SiO ₂								
TiO ₂	-0,031							
Al ₂ O ₃	-0,458	0,922						
Fe ₂ O ₃	-0,294	0,576	0,558					
MnO	-0,043	0,055	0,076	0,135				
CaO	0,209	-0,373	-0,331	-0,194	-0,049			
K ₂ O	-0,570	0,682	0,843	0,649	0,002	-0,193		
V (ppm)	-0,134	0,052	0,216	0,113	0,002	-0,267	0,114	

Los diagramas de dispersión de las variables químicas, para cada uno de los tres pozos estudiados podrán ser encontrados en el Apéndice 4.

6.2. ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE

Este procesamiento lo iniciamos por el análisis de agrupaciones, el cual tiene como finalidad la separación de grupos o unidades que poseen características semejantes. Posteriormente se utiliza el método de las funciones discriminantes con el fin de comprobar la validez estadística de las unidades propuestas por el análisis de agrupaciones. Las unidades definidas por estos métodos estadísticos son provisionales, ya que las mismas deberán ser comparadas con las unidades definidas a través de los perfiles de distribución de las variables químicas, radiométricas y de color Munsell.

Esta metodología de procesamiento se realizará para cada uno de los pozos y en cada caso se procederá con el análisis para las variables químicas, radiométricas y para las químico-radiométricas.

Es importante señalar que debido a que MgO , en general está debajo del límite de detección del instrumento utilizado, el mismo no se tomará en cuenta para efectos de los análisis antes descritos.

Los coeficientes de las funciones discriminantes generadas podrán ser encontrados en el Apéndice 6.

6.2.1. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL POZO 1

Variables químicas

La figura 15, muestra el dendrograma elaborado a partir de las variables químicas del pozo 1. En el mismo se encuentran marcadas las unidades definidas en base al método de análisis de agrupaciones. Es importante señalar que el dendrograma, fue generado con 32 muestras en 90 m de profundidad total, y la distribución de las mismas a lo largo del pozo no es homogénea.

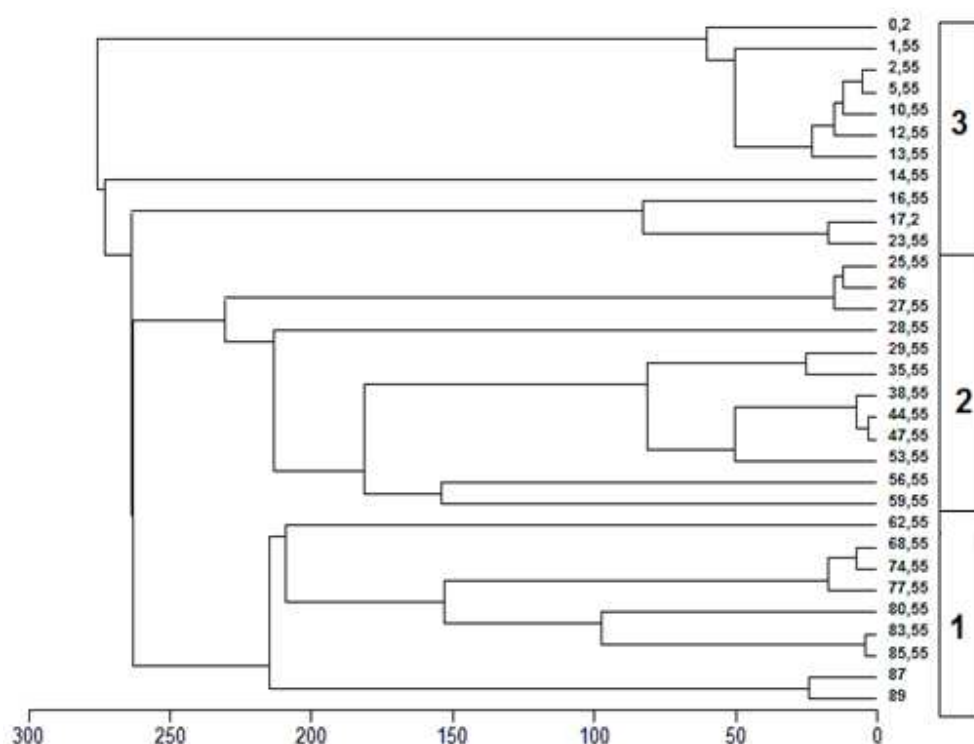


Figura 15. Dendrograma construido usando las variables químicas del pozo 1.

Seguidamente, se emplea el método de funciones discriminantes utilizando como criterio de separación, las unidades definidas por el dendrograma de la figura 15. En la tabla 9 y la figura 16 se presentan los resultados de dicho análisis.

Tabla 9. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 1.
Casos bien clasificados 84,4%.

Unidad química	Numero de muestras	Predicción		
		1	2	3
3	11	10	0	1
		90,90%	0%	9,10%
2	12	1	10	1
		8,30%	83,40%	8,30%
1	9	0	2	7
		0%	22,20%	77,80%

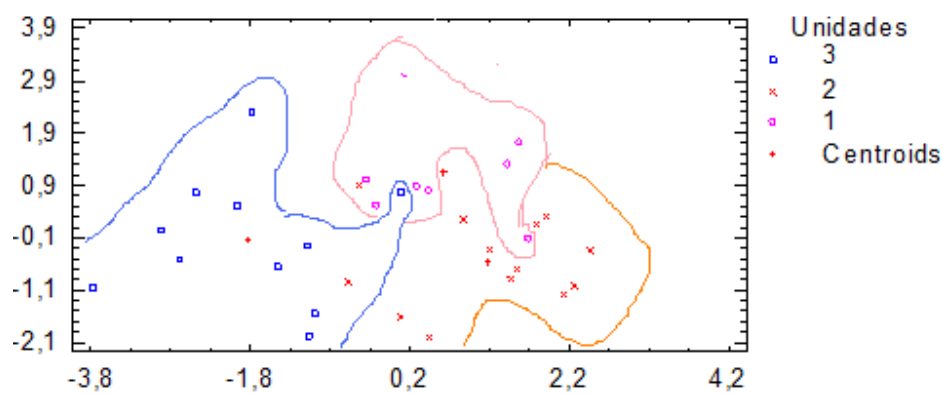


Figura 16. Gráfico de las funciones discriminantes obtenido mediante las variables químicas del pozo 1.

Variables radiométricas

El dendrograma (figura 17) muestra las unidades definidas en base a este método.

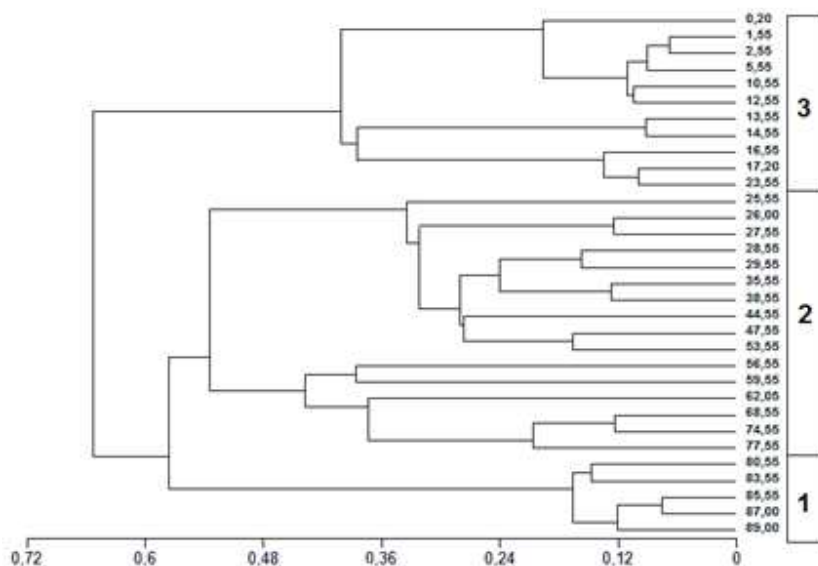


Figura 17. Dendrograma generado usando variables radiométricas en el pozo 1.

Seguidamente, las unidades definidas por el método del análisis de agrupaciones serán usadas como criterio de separación en el análisis de funciones discriminantes, los resultados del mismo serán presentados en la tabla 10 y figura 18.

Tabla 10. Clasificación de las muestras por funciones discriminates del pozo 1.
Casos bien clasificados 100%.

Unidad radiométrica	Numero de muestras	Predicción		
		1	2	3
3	11	11	0	0
		100%	0%	0%
2	16	0	16	0
		0%	100%	0%
1	5	0	0	5
		0%	0%	100%

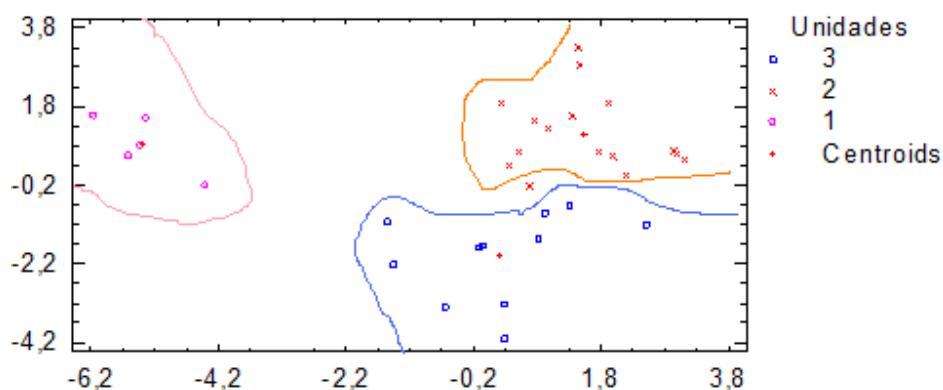


Figura 18. Gráfico de las funciones discriminantes elaborado con las variables radiométricas del pozo 1.

Variables químico-radiométricas

El dendrograma mostrado en la figura 19, fue creado usando las variables químicas y radiométricas del pozo 1. Adicionalmente se muestran las unidades definidas en base a este método.

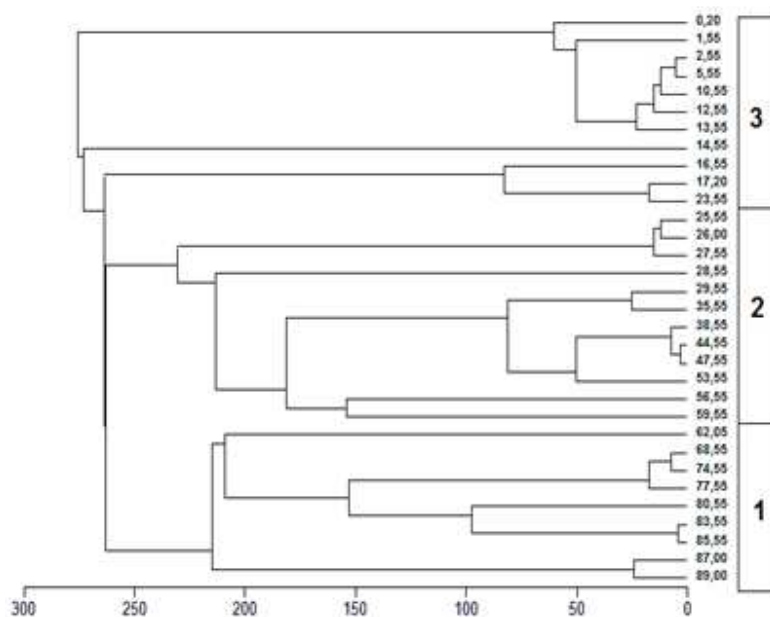


Figura 19. Dendrograma elaborado usando variables químicas y radiométricas en el pozo 1.

Se realizó el análisis de agrupaciones, siendo el criterio de separación empleado, las unidades generadas mediante el análisis de agrupaciones (figura 19), estos resultados se muestran en la tabla 11 y figura 20.

Tabla 11. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 1. Casos bien clasificados 100%.

Unidad químico – radiométrica	Numero de muestras	Predicción		
		1	2	3
3	11	11	0	0
		100%	0%	0%
2	12	0	12	0
		0%	100%	0%
1	9	0	0	9
		0%	0%	100%

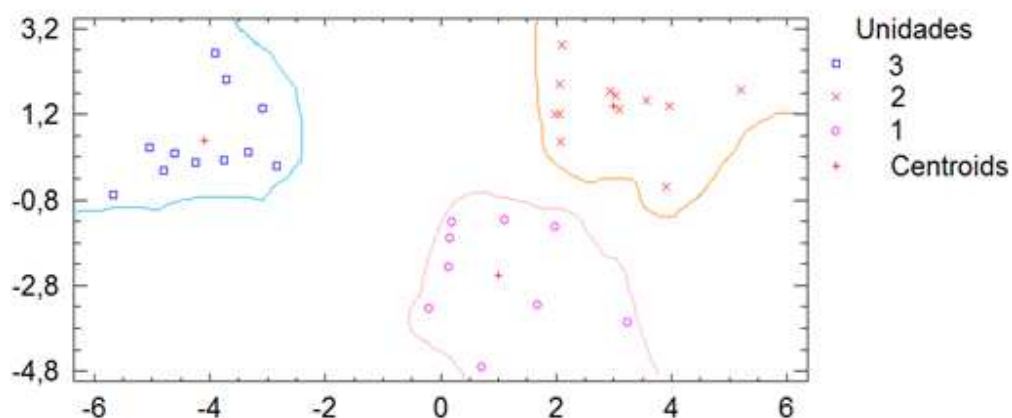


Figura 20. Gráfico de las funciones discriminantes elaborado con las variables químicas y radiométricas del pozo 1.

Una vez analizadas las variables químicas, radiométricas y químico-radiométricas, se realizó la comparación entre los distintos dendrogramas del pozo 1 (figura 21), así mismo se presenta una tabla comparativa (tabla 12) entre los porcentajes de casos bien clasificados de muestras, realizadas por medio de las funciones discriminantes.

Tabla 12. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 1, en base a los métodos estadísticos.

Unidad	Variables		
	Químicas	Radiométricas	Químicas-radiométricas
POZO 1-3	10/11*	11/11	11/11
POZO 1- 2	10/12	16/16	12/12
POZO 1-1	7/9	5/5	9/9
% de casos bien clasificados	84,4%	100%	100%

* Abreviatura: 10/11= 10 aciertos de un total de 11 muestras.

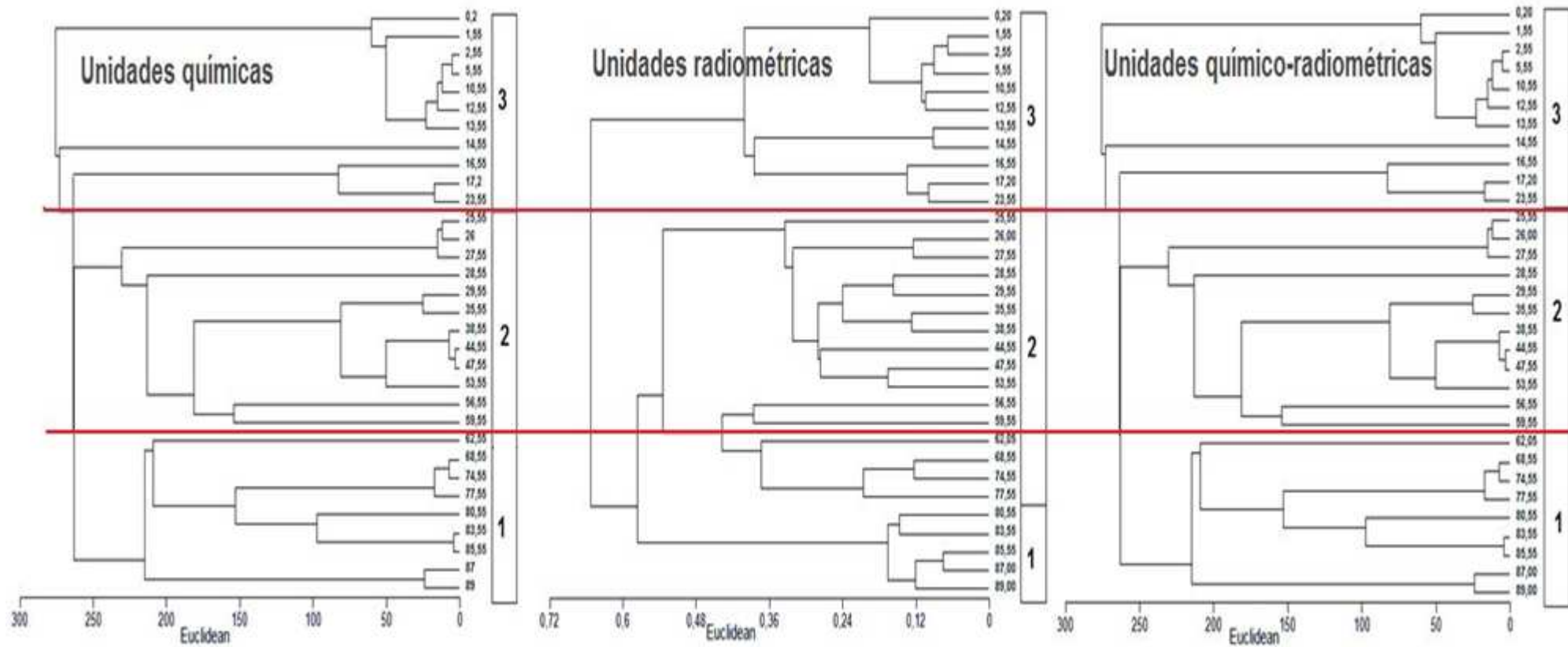


Figura 21. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 1. Las líneas rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes mencionado.

6.2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL POZO 3

Variables químicas

A partir de las variables químicas estudiadas en el pozo 3, se elaboró el dendrograma mostrado en la figura 22, en el mismo se muestran las unidades y sub-unidades definidas en base al método de análisis de agrupaciones.

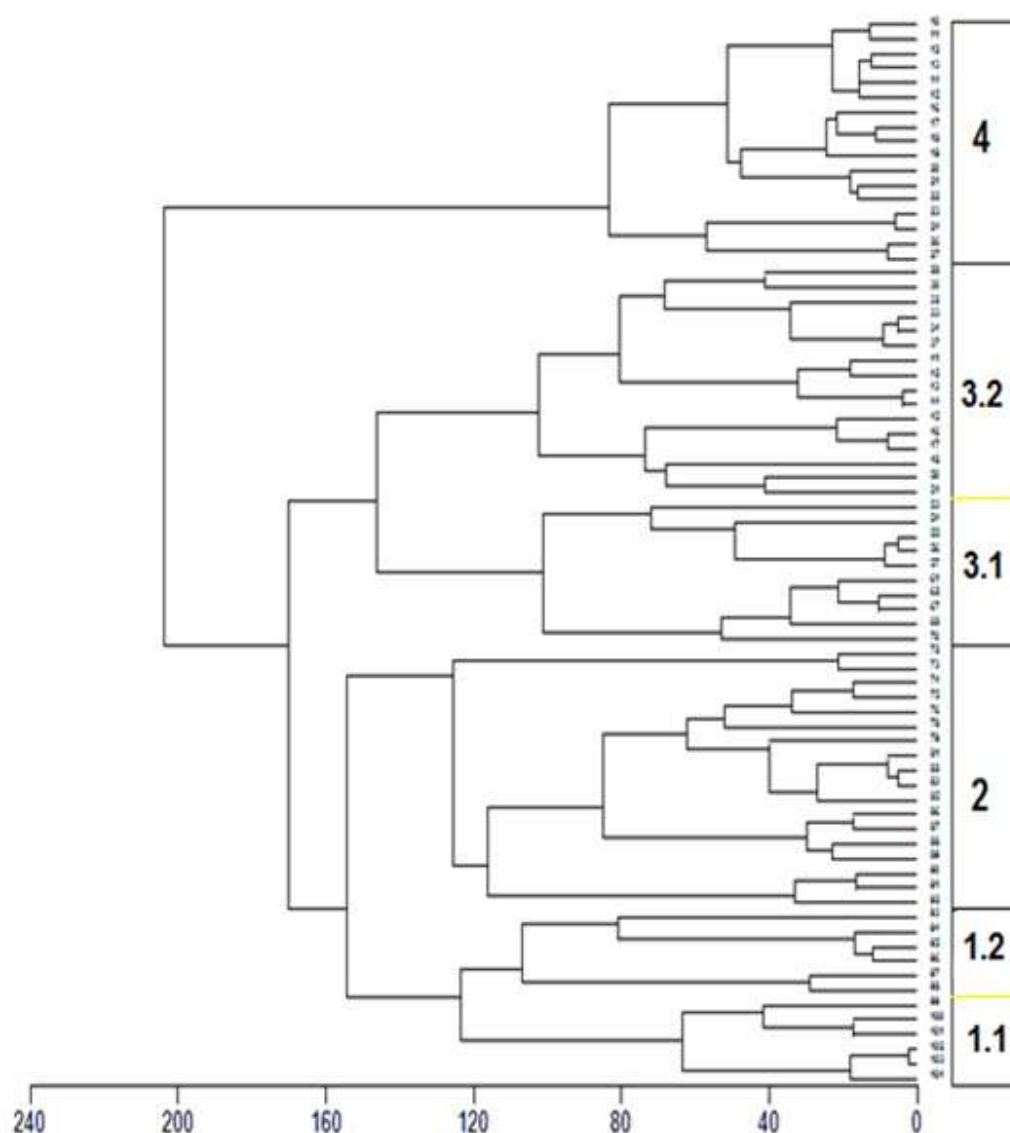


Figura 22. Dendrograma generado usando variables químicas en el pozo 3.

Tomando en consideración las unidades generadas por el análisis de agrupaciones, se empleó el método de las funciones discriminantes utilizando variables químicas del pozo 3, teniendo como resultado la tabla 13 y la figura 23.

Tabla 13. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 72,6%.

Unidad química	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	17	17	0	0	0
		100%	0%	0%	0%
3	26	0	15	5	6
		0%	57,7%	19,2%	23,1%
2	18	0	1	13	4
		0%	5,6%	72,2%	22,2%
1	12	0	3	1	8
		0%	25%	8,3%	66,7%

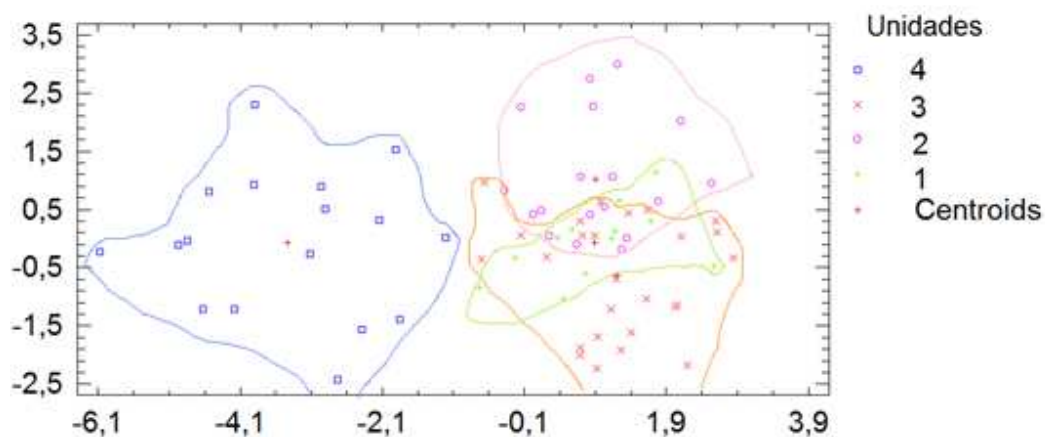


Figura 23. Gráfico de las funciones discriminantes para el pozo 3, elaborado en base a variables químicas.

Variables radiométricas

El dendrograma de la figura 24, se presenta las unidades y sub-unidades radiométricas definidas.

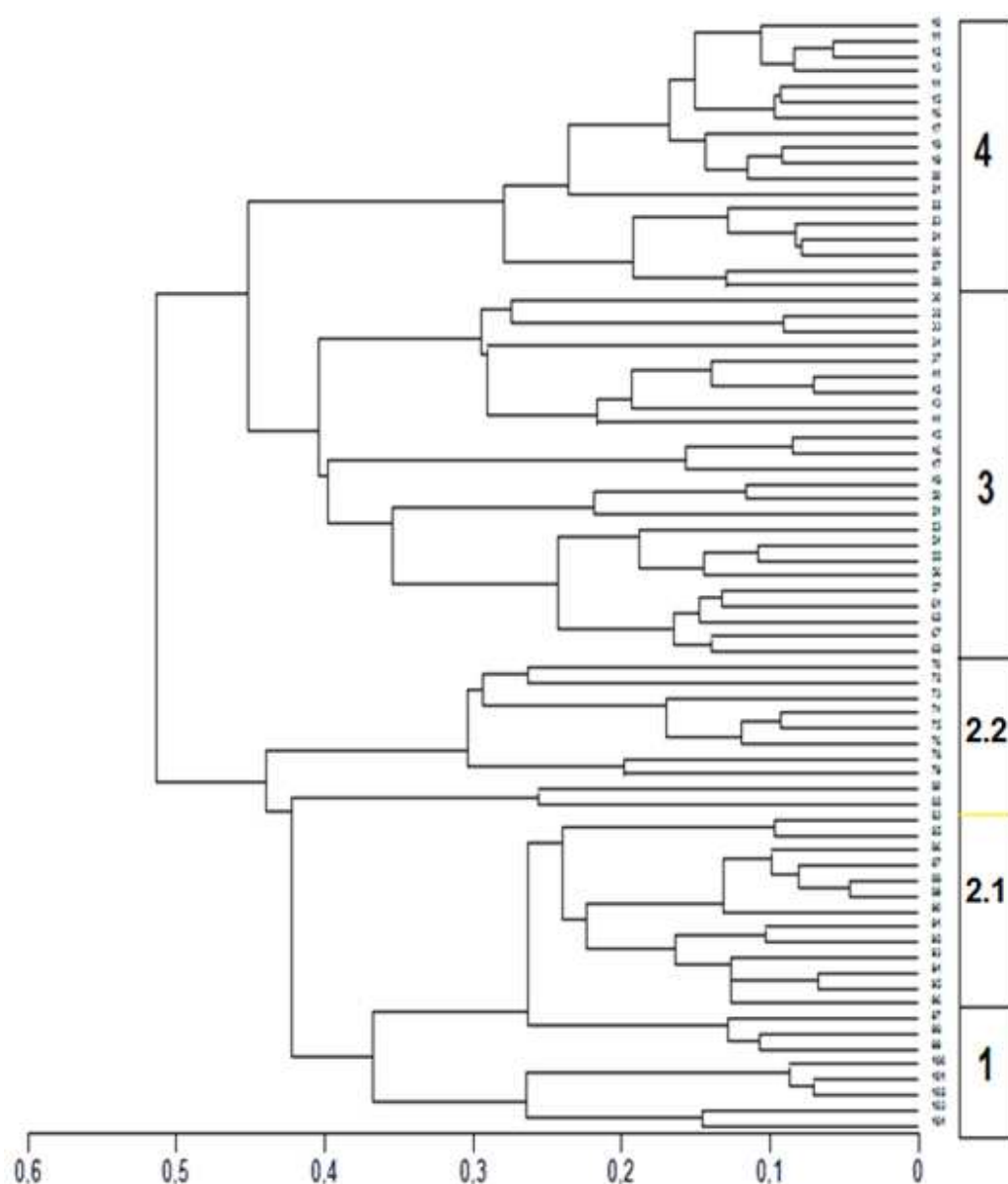


Figura 24. Dendrograma creado mediante el uso de las variables radiométricas en el pozo 3.

Seguidamente, se emplea el método de funciones discriminantes utilizando como criterio de separación, las unidades definidas por el método anterior. En la tabla 14 y la figura 25 se presentan los resultados de dicho análisis.

Tabla 14. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 67,1%.

Unidad radiométrica	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	18	16	1	0	1
		88,9%	5,6%	0%	5,6%
3	24	5	15	0	4
		20,8%	62,5%	0%	16,7%
2	23	0	1	12	10
		0%	4,3%	52,2%	43,5%
1	8	0	1	1	6
		0%	12,5%	12,5%	75%

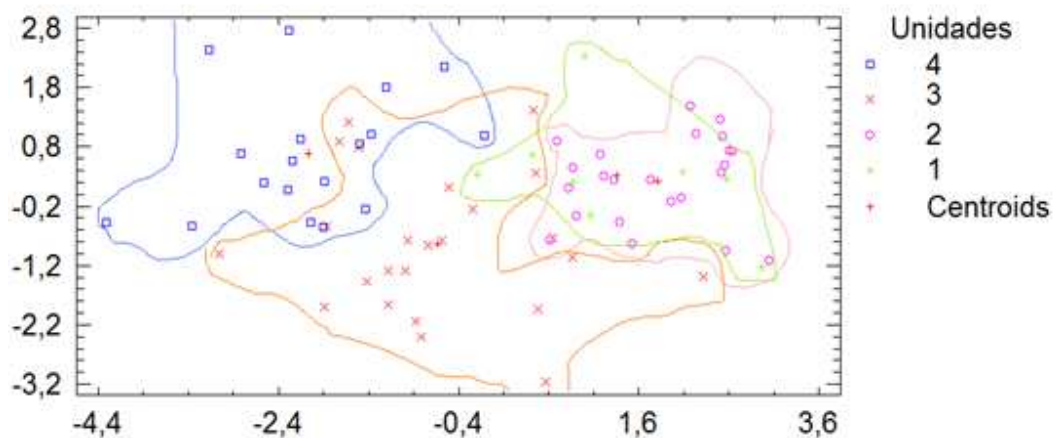


Figura 25. Gráfico de las funciones discriminantes generadas con los componentes radiométricos del pozo 3.

Variables químico-radiométricas

A continuación se muestra el dendrograma generado a partir de las variables químicas y radiométricas del pozo 3 (figura 26).

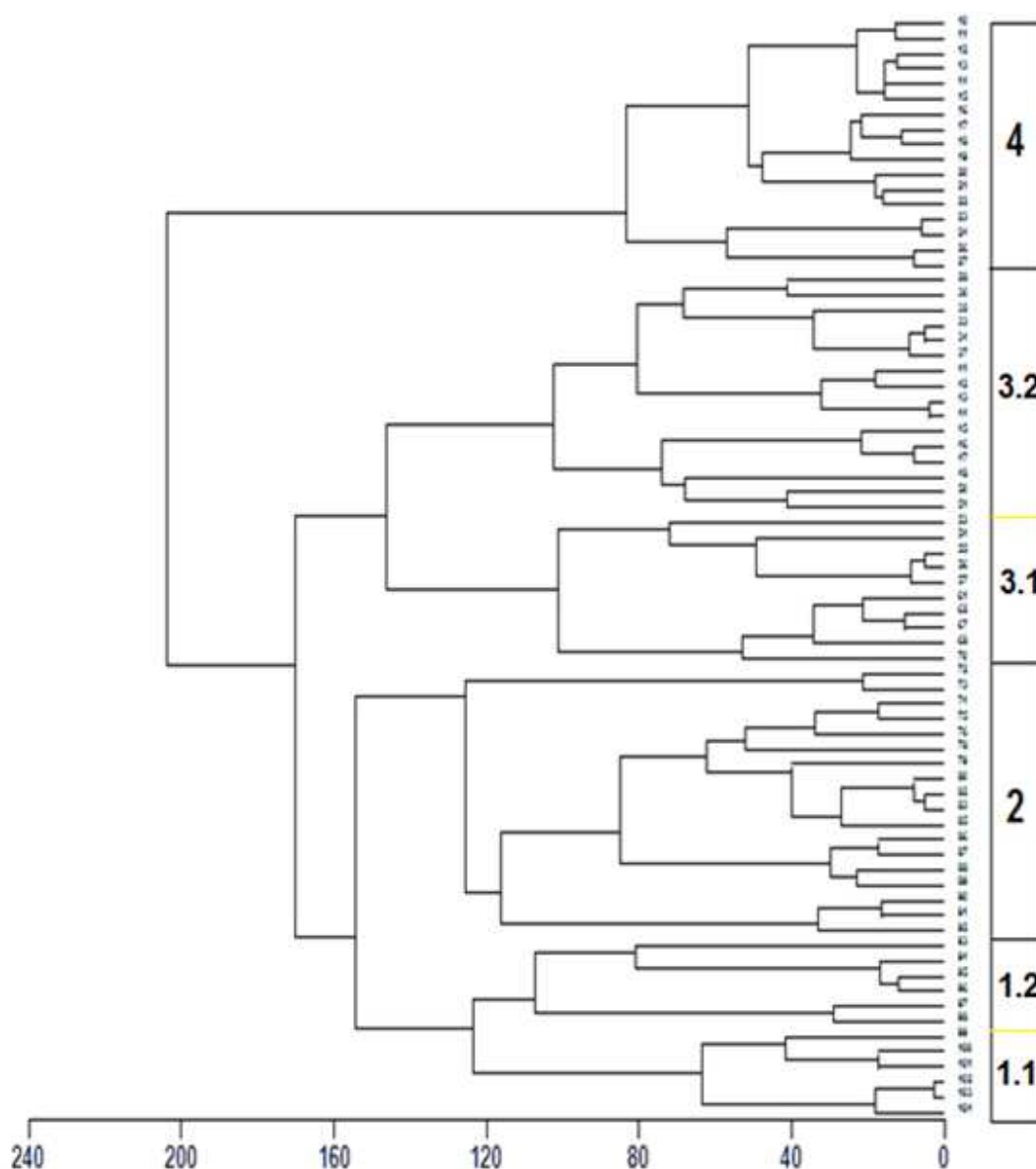


Figura 26. Dendrograma elaborado utilizando variables químicas y radiométricas en el pozo 3. Se muestra la división de unidades y sub-unidades generadas en base a este método.

Tomando como criterio de separación las unidades generadas en base al análisis de agrupaciones, se realizó el estudio de las funciones discriminantes, cuyos resultados serán mostrados en la tabla 15 y la figura 27.

Tabla 15. Clasificación de las muestras por funciones discriminantes del pozo 3. Casos bien clasificados 89%.

Unidad químico-radiométrica	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	17	16	0	0	1
		94,1%	0%	0%	5,9%
3	26	0	23	1	2
		0,0%	88,3%	4%	7,7%
2	18	0	0	15	3
		0%	0%	83,3%	16,7%
1	12	0	1	0	11
		0%	8,3%	0%	91,7%

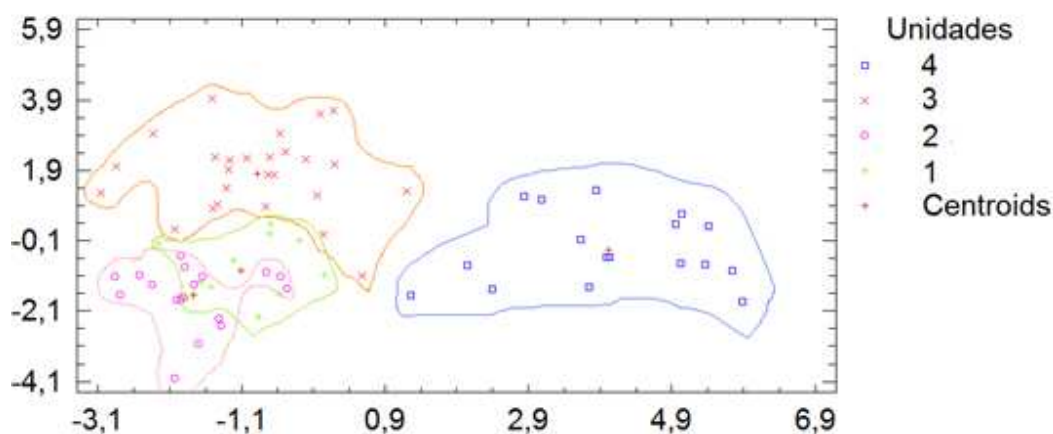


Figura 27. Gráfico de las funciones discriminantes, elaborada utilizando variables químicas y radiométricas para el pozo 3.

Para concluir con el procesamiento de datos en el pozo 3, se muestra una comparación entre los dendrogramas químicos, radiométricos y los químicos-radiométricos del pozo 3 (figura 28), de igual forma se elaboró una tabla resumen con la comparación entre los casos bien clasificados por medio del análisis de funciones discriminantes (tabla 16).

Tabla 16. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 3, en base a los métodos estadísticos.

Unidad	Variables		
	Químicas	Radiométricas	Químicas-radiométricas
Pozo 3 -4	17/17*	16/18	16/17
Pozo 3 -3	15/26	15/24	23/26
Pozo 3 -2	13/18	12/23	15/18
Pozo 3 -1	8/12	6/8	11/12
% de casos bien clasificados	72,6%	67,1%	89%

** Abreviatura: 17/17= 17 aciertos de un total de 17 muestras.*

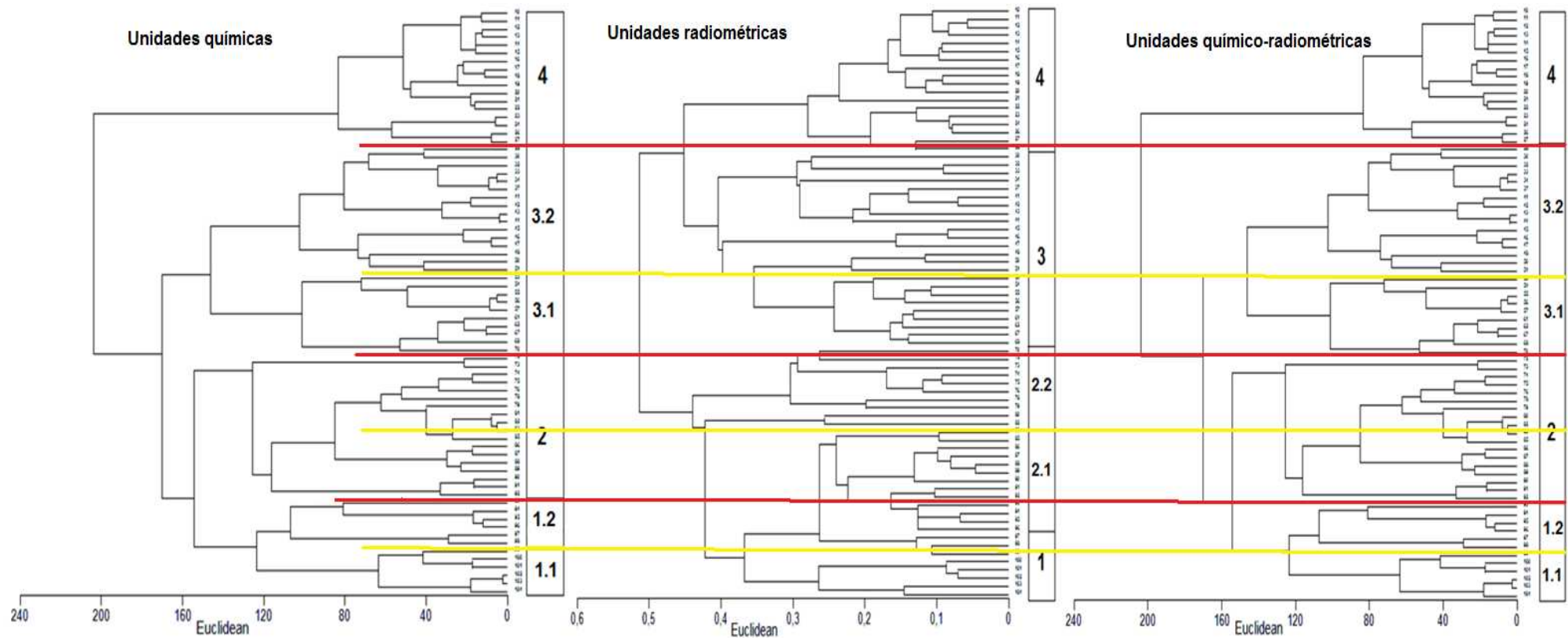


Figura 28. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 3. Las líneas rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes mencionado.

6.3. COMPARACIÓN ENTRE POZOS 1 Y 3

Una vez analizadas las muestras de las perforaciones 1 y 3 por medio de los métodos de estadística multivariante, y tomando en cuenta la cercanía entre ellos (2,5 m) se considera oportuno realizar una comparación entre dichos pozos, ubicados en la ciudad de Barquisimeto, estado Lara.

Las 32 muestras del pozo 1 (P-1) fueron obtenidas por medio de una perforación geotécnica (SPT), las muestras fueron tomadas desde la superficie hasta los 91,5 m de profundidad, sin embargo las muestras no están distribuidas de forma homogénea a lo largo del pozo.

Por su parte las 73 muestras del pozo 3 (P-3) fueron obtenidas mediante una perforación geofísica, que recolecto muestras desde los 10 m de profundidad hasta los 105 m, para su perforación se uso lodo con base bentonita.

Una de las características que distingue las muestras del SPT, de las del pozo geofísico usadas para los análisis químicos y/o radiométricos es, el empleo de la bentonita en la segunda, aunado a la más precisa técnica de muestreo de la primera. El grado de perturbación de las muestras del SPT, es casi nulo. Por esto, la precisión de la profundidad de las muestras obtenidas en el pozo 1, es mayor respecto al pozo 3. Al mismo tiempo ésta es una representación puntual del sedimento, mientras que las muestras que contienen bentonita (pozo geofísico) constituyen un promedio perturbado de la composición de los sedimentos en profundidad.

Adicionalmente, debido a que la bentonita está compuesta principalmente por montmorillonita, (formula química $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), las muestras del pozo 3 pueden estar contaminadas y/o enriquecidas con los componentes CaO , Al_2O_3 , MgO y SiO_2 . Adicionalmente, trabajos de ADAMS & WEAVER (1958) señalan que la bentonita presenta altos valores de Th y U, es decir que las muestras expuestas la bentonita podrían tener mayor radioactividad natural.

A continuación se presentan los diagramas de caja para algunas variables químicas (figura 29) y radiométricas (figura 30) seleccionadas de los pozos perforados en Barquisimeto.

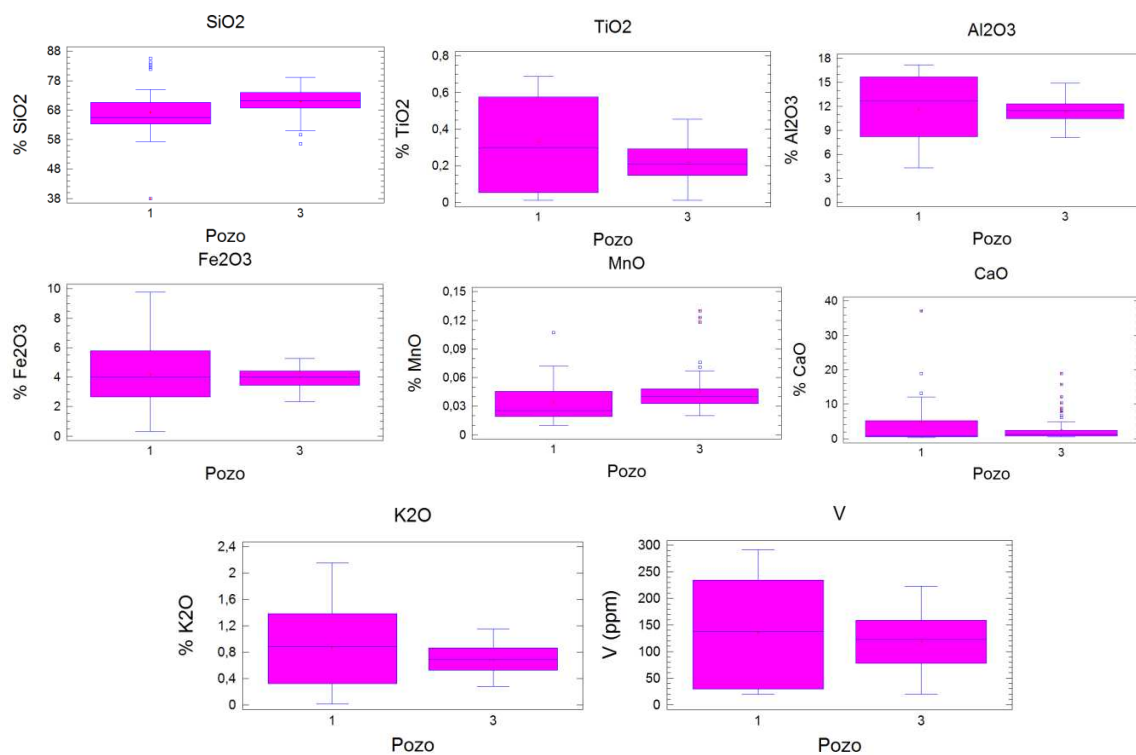


Figura 29. Diagramas de caja elaborados usando las variables químicas en los pozos 1(SPT) y 3 (pozo geofísico con bentonita).

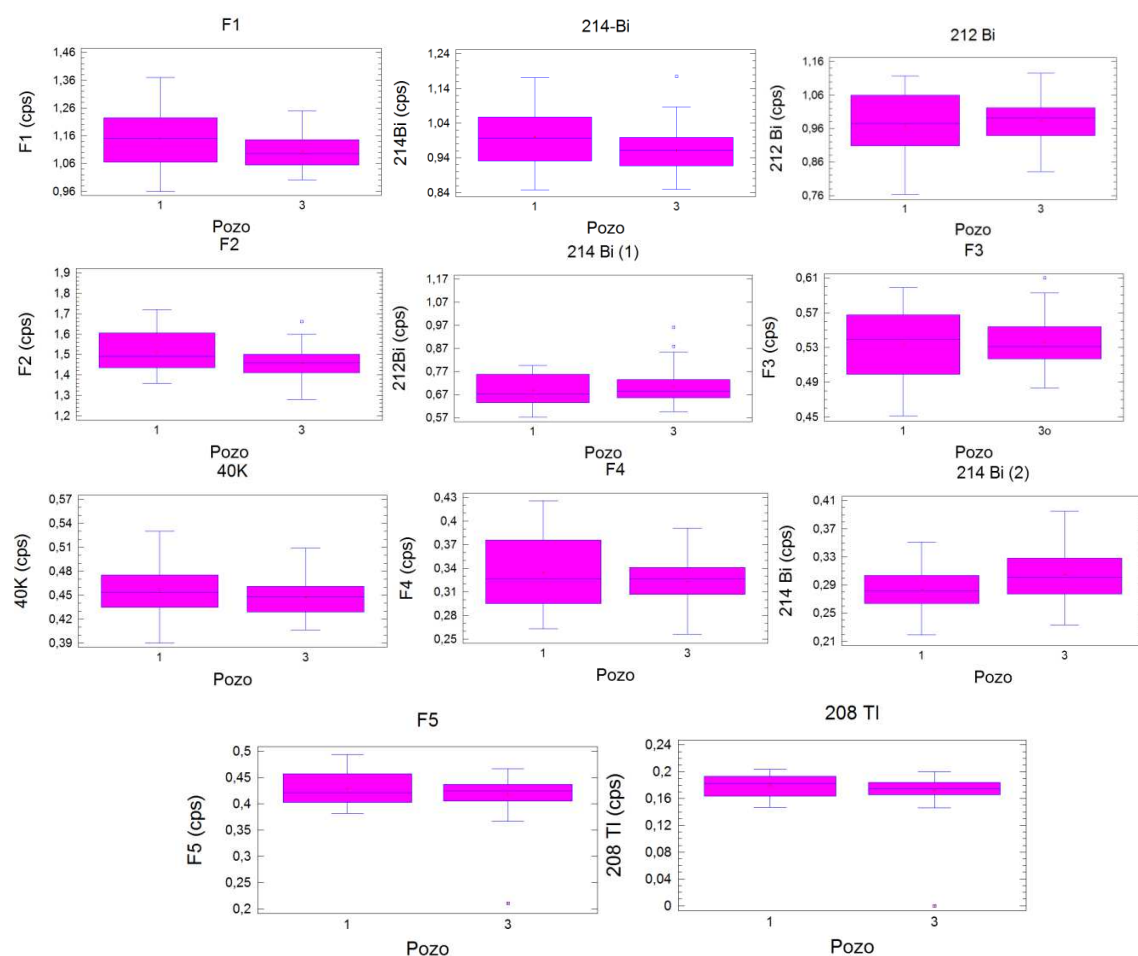


Figura 30. Diagramas de caja elaborados usando las variables radiométricas de los pozos 1 (SPT) y 3 (pozo geofísico con bentonita).

Mediante la aplicación de la prueba estadística Z, se encontró que los promedios de las concentraciones de las variables químicas y radiométricas en los pozos 1 y 3 sólo muestran diferencias estadísticas significativas para las variables SiO_2 , CaO y V , las cuales presentan valores $Z > 2,329$ ($\alpha=0,01$). (Los valores de la prueba Z, realizada a las variables químicas y radiométricas de los pozos 1 y 3, se presentan en el Apéndice 6).

Estas diferencias estadísticas se pueden atribuir a la naturaleza de los pozos (SPT y geofísico), ya que como fue mencionado anteriormente la bentonita utilizada para la perforación del pozo 3, puede influir químicamente en las muestras, causando posiblemente un enriquecimiento en CaO y Al_2O_3 .

Adicionalmente, otra variable que puede estar involucrada en la no correspondencia directa entre los promedios de las concentraciones de las variables químicas y radiométricas entre los pozos 1 (perforación geotécnica) y 3 (perforación geofísica), se relaciona con el tipo de material. El material perforado en la ciudad de Barquisimeto no es homogéneo, es decir, que puede existir poca escogencia tanto en el tamaño, como en la composición de los clastos (esto puede observarse en la figura 32 donde se muestra las columnas estratigráficas de las perforaciones 1 y 3). Por lo tanto, si el tamaño de un clasto supera el radio de la cuchara del SPT, éste tomará una muestra bastante puntual que no corresponde con las características del material en general a esa profundidad. Caso contrario para un clasto del mismo tamaño, la perforación con mecha (P-3) trituraría totalmente el mismo, incluso la muestra de canal que va a la superficie, se llevará consigo también parte del material adyacente al clasto, teniendo como resultado una representación algo más amplia, aunque contaminada con bentonita. Esta situación se considera la principal causante de los valores diferentes de SiO_2 , CaO y V observados en los pozos.

De las figuras 29 y 30 se observa una mayor dispersión de datos alrededor de la media en el pozo 1, respecto al pozo 3. Esta diferencia se puede atribuir al tipo de muestreo de este pozo, el cual es más preciso pero se hace de forma puntual, mientras que en el pozo 3 las muestras corresponden a promedios de sedimento perforado. Es decir, los cambios litológicos en el pozo 3, se muestran como el promedio de la concentración de variables químicas y radiométricas de los sedimentos involucrados en dicho cambio, mientras que en el pozo 1 se muestra la composición (química y radiométrica) puntual de un estrato y del otro estrato por separado, generando esto la dispersión observada, debida principalmente a las abundantes intercalaciones de sedimentos grava-arena con arcilla. Mediante la elaboración de los histogramas de frecuencia para las variables de mayor dispersión TiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , mostrados en la figura 31 donde se observa un comportamiento unimodal para el pozo 3 y un comportamiento bimodal para el pozo 1, lo que confirma lo anteriormente planteado, que la mayor dispersión de datos observada en el pozo 1, se debe al tipo de muestreo realizado.

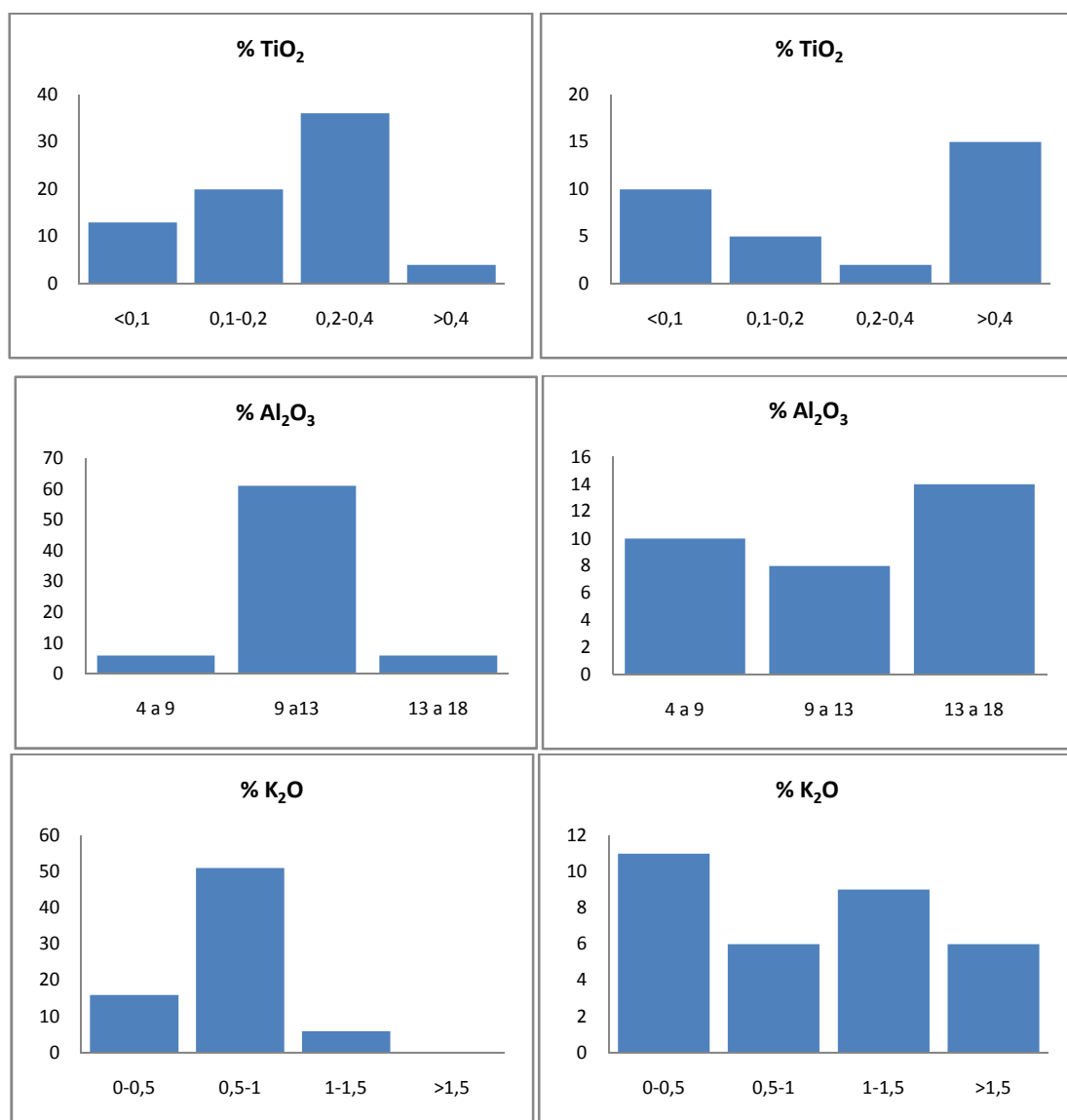


Figura 31. Histogramas de frecuencia para las variables TiO_2 , K_2O y Al_2O_3 de los pozos 3 (izquierda) y 1(derecha).

Los análisis de agrupaciones y de funciones discriminantes realizados anteriormente a los pozos 1 y 3, confirman la existencia de tres unidades en el pozo SPT y cuatro unidades en el pozo 3. Sin embargo es de hacer notar que a excepción de la unidad más profunda del pozo 3, las unidades definidas estadísticamente en los pozos 1 y 3 son coherentes.

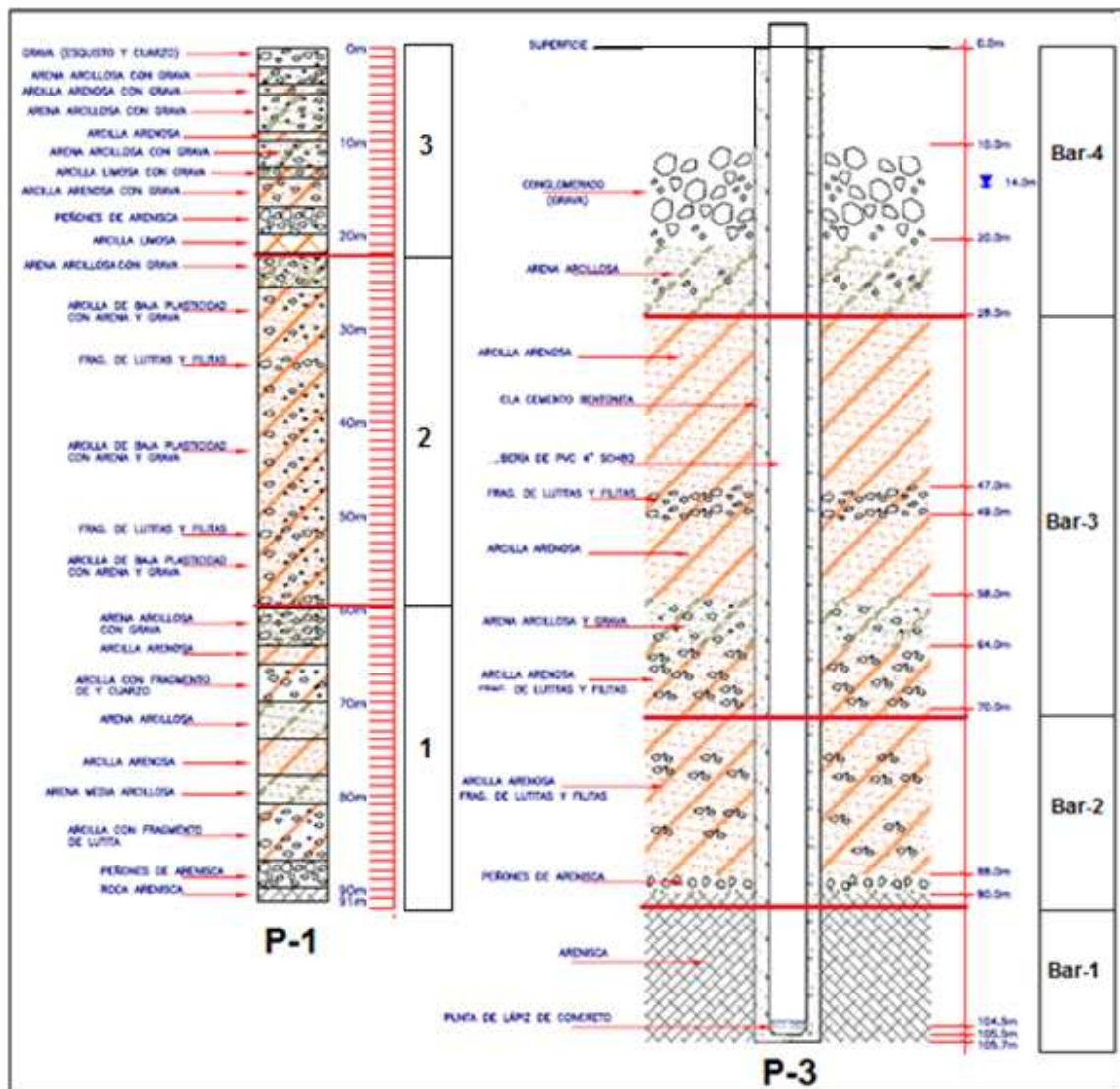


Figura 32. Columna estratigráfica de los pozos 1 y 3, ubicados en Barquisimeto, estado Lara. En línea roja se muestran los límites de las unidades definidas en este trabajo. Tomado de GISCA (2006).

Como se observa de la figura 32, los límites establecidos por medio de los análisis estadísticos multivariantes entre las unidades del pozo 1 y las del pozo 3 no coincidieron exactamente, esto como se describió anteriormente se debe a que el pozo SPT (pozo 1), si bien tiene un muestreo más preciso, el mismo no se realizó de forma homogénea a lo largo del pozo, además el tipo de sedimento presente en la ciudad de Barquisimeto es heterogéneo.

La unidad más profunda del pozo 3, denominada Bar-1, no se encontró en el pozo 1 (SPT) debido a que la unidad comienza (en el pozo 3) a los 93 m de profundidad, y el pozo 1 sólo llega a los 91 m de profundidad (figura 32); es decir la unidad Bar-1 infrayace a la perforación SPT.

Lo anteriormente expuesto permite agrupar las unidades provisionales de los pozos 1 y 3 bajo el nombre de unidades de “Barquisimeto”. Por ello, en adelante se referirá a los pozos 1 y 3 como pozos de “Barquisimeto”.

6.4. PROCESAMIENTO DE DATOS DEL POZO 6

Variables químicas

En la figura 33, se presenta el dendrograma generado utilizando las variables químicas del pozo 6, y se muestran las unidades y sub-unidades definidas con este método.

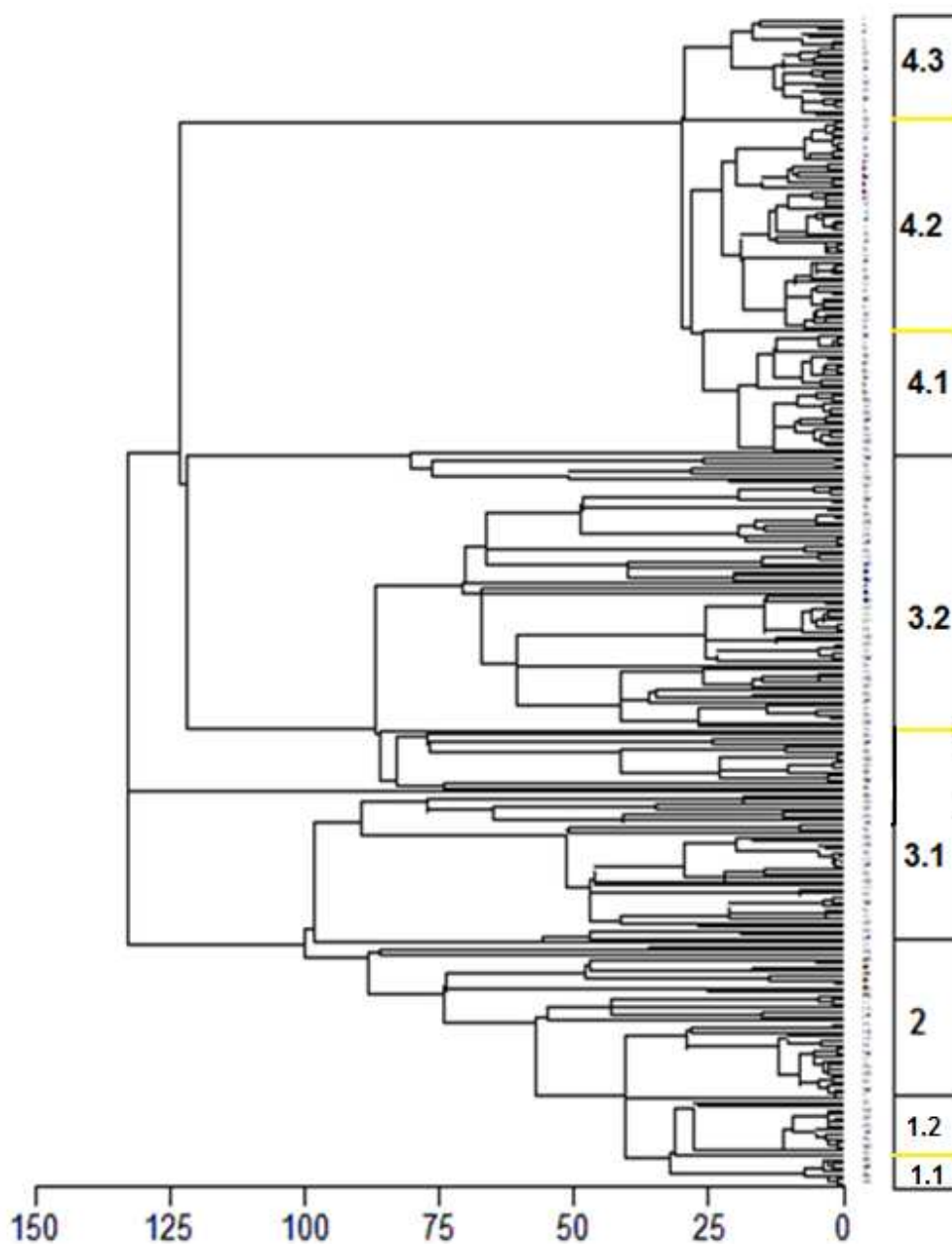


Figura 33. Dendrograma generado usando variables químicas en el pozo 6.

Seguidamente, se realizó el análisis de funciones discriminantes usando las variables químicas del pozo 6, y como criterio de separación las unidades definidas por el dendrograma de la figura 33. Los resultados de las funciones discriminantes serán mostrados en la tabla 17 y figura 34 presentadas a continuación.

Tabla 17. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 91,6%.

Unidad química	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	106	98	6	0	2
		92,5%	5,7%	0%	1,9%
3	128	4	122	2	0
		3,1%	95,3%	1,6%	0%
2	30	0	2	24	4
		0%	6,7%	80%	13,3%
1	22	0	0	4	18
		0%	0%	18,2%	81,8%

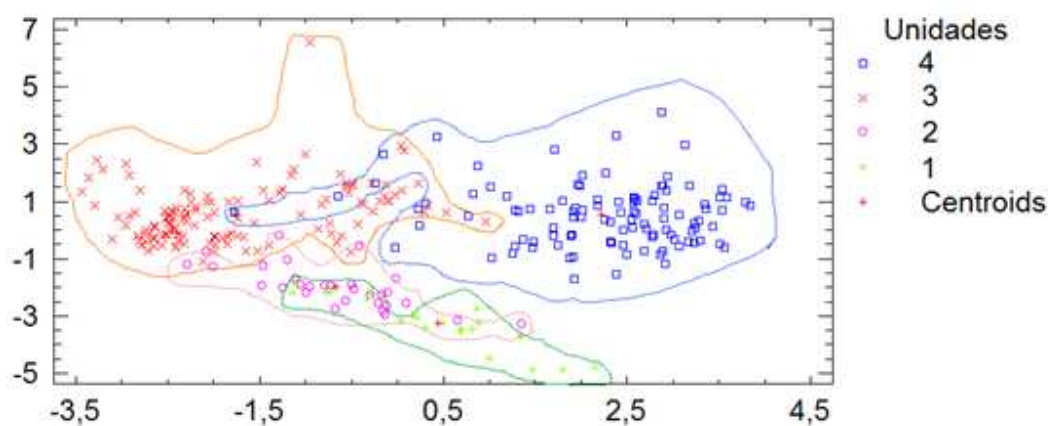


Figura 34. Gráfico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables químicas.

Variables radiométricas

En el dendrograma (figura 35) se encuentran marcadas las unidades y sub-unidades definidas.

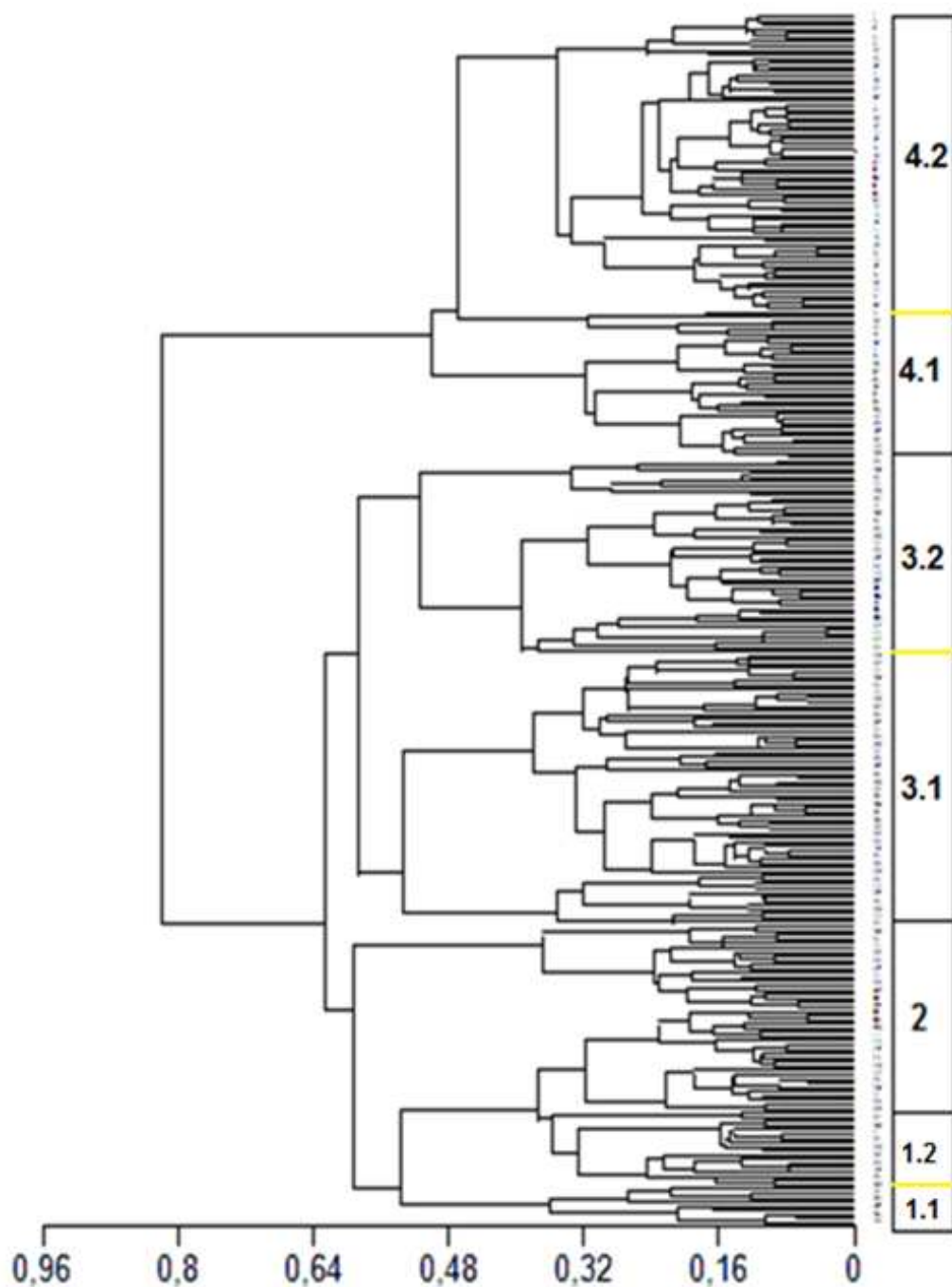


Figura 35. Dendrograma elaborado usando variables radiométricas en el pozo 6.

Utilizando las unidades generadas por el dendrograma de la figura 35, se realizó el análisis de las funciones discriminantes, cuyos resultados se muestran en la tabla 18 y la figura 36.

Tabla 18. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 69%.

Unidad radiométrica	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	107	101	2	0	4
		94,4%	1,9%	0%	3,7%
3	109	9	53	32	15
		8,3%	48,6%	29,4%	13,8%
2	43	0	13	23	7
		0%	30,2%	53,5%	16,3%
1	27	0	6	2	19
		0%	22,2%	7,4%	70,4%

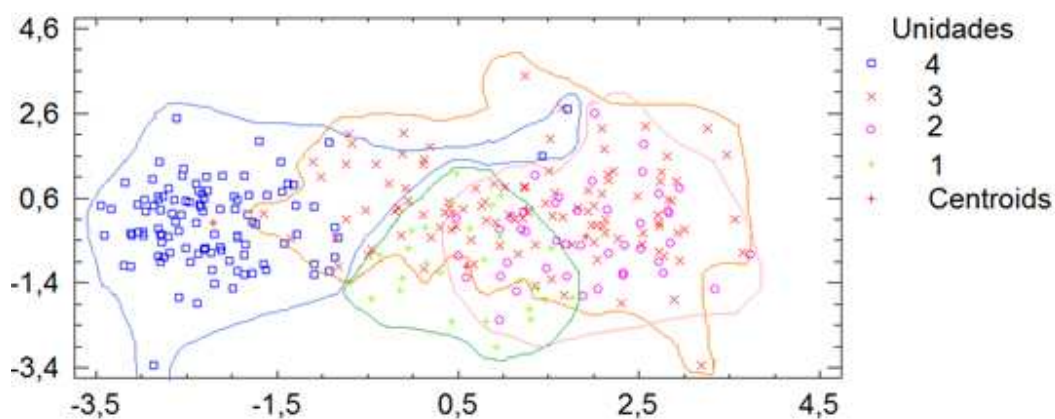


Figura 36. Gráfico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables radiométricas.

Variables químicas-radiométricas

La figura 37 muestra el dendrograma con las unidades y sub-unidades definidas en base al método de análisis de agrupaciones.

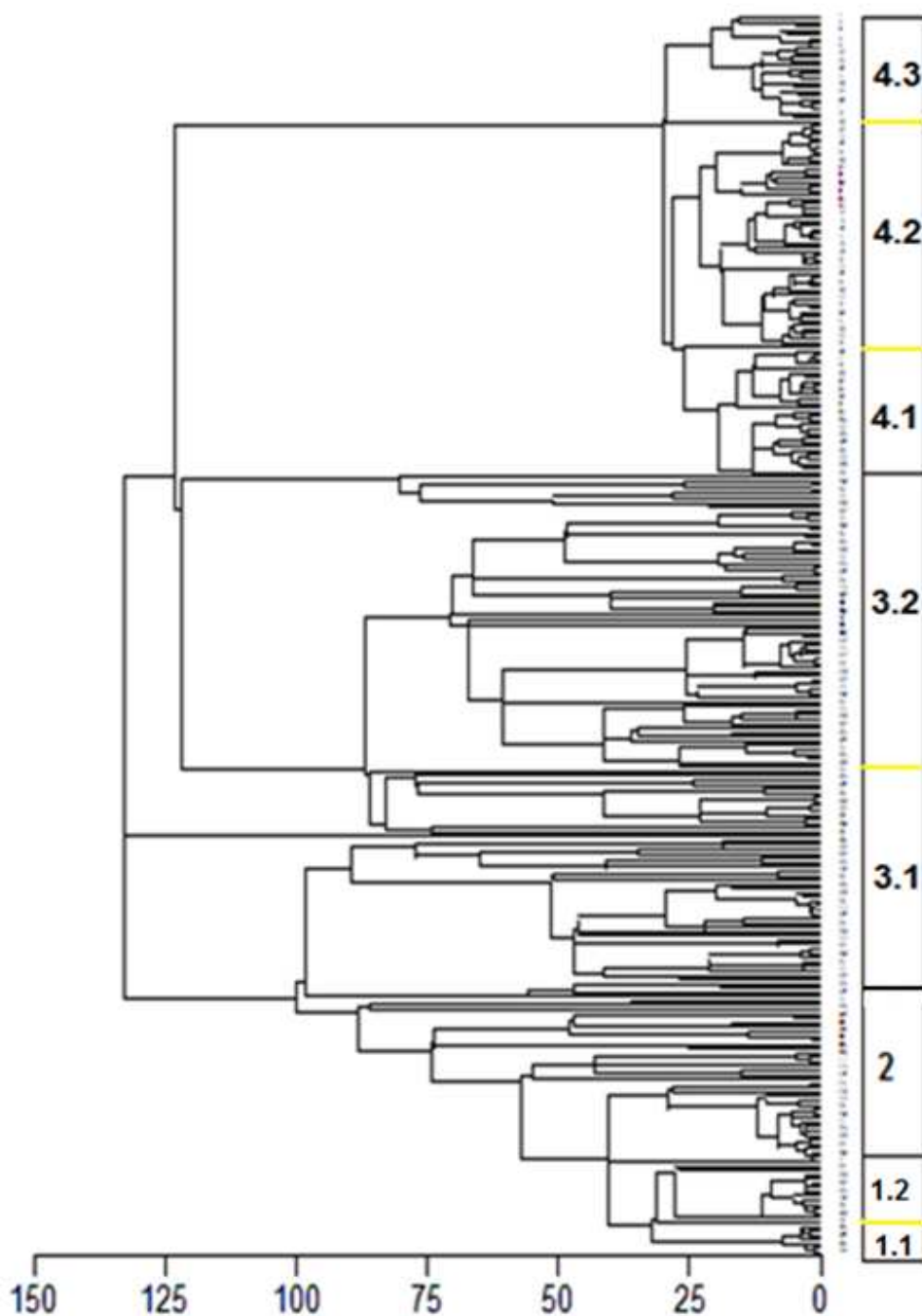


Figura 37. Dendrograma realizado usando variables químicas y radiométricas en el pozo 6.

Tomando como criterio de separación las unidades señaladas por la figura 37, se realizó el análisis de funciones discriminantes, sus resultados se muestran en la tabla 19 y la figura 38.

Tabla 19. Clasificación de muestras mediante funciones discriminantes del pozo 6. Porcentaje de acierto 90,2%.

Unidad químico-radiométrica	Numero de muestras	Predicción			
		1	2	3	4
4	107	102	4	0	1
		95,3%	3,7%	0%	0,9%
3	120	3	110	7	0
		2,5%	91,7%	5,8%	0,0%
2	37	0	6	29	2
		0,0%	16,2%	78,4%	5,4%
1	22	0	0	5	17
		0,0%	0,0%	22,7%	77,3%

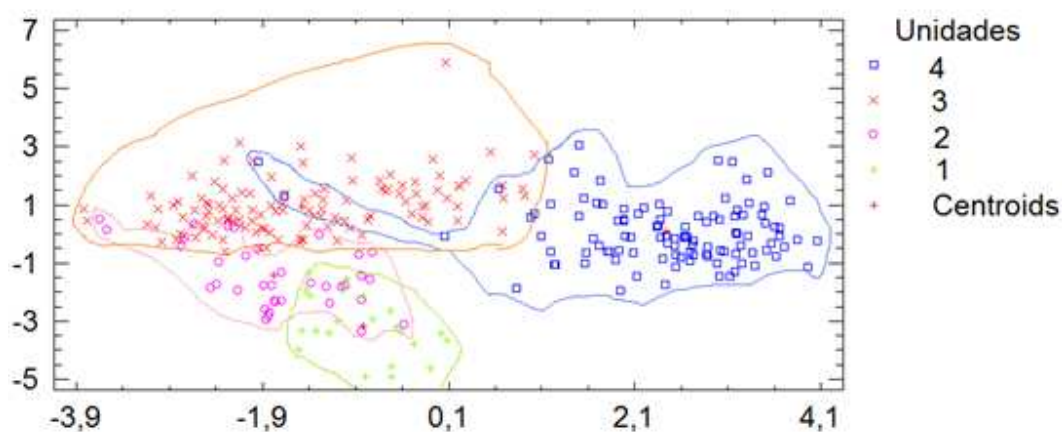


Figura 38. Gráfico de las funciones discriminantes para el pozo 6, elaborado en base a variables químicas-radiométricas.

Para finalizar al análisis estadístico del pozo 6, se muestra la comparación entre los dendrogramas elaborados con las variables químicas, radiométricas y químico-radiométricas del pozo (figura 39). Igualmente se presenta en forma resumida los resultados del análisis de las funciones discriminantes (tabla 20).

Tabla 20. Comparación los porcentajes de acierto de las unidades definidas en el pozo 6, en base a los métodos estadísticos.

Unidad	Variables		
	Químicas	Radiométricas	Químicas-radiométricas
Pozo 6 -4	98/106*	101/107	102/107
Pozo 6 -3	122/128	53/109	110/120
Pozo 6 -2	24/30	23/43	29/37
Pozo 6 -1	18/22	19/27	17/22
% de casos bien clasificados	91,5%	68,5%	90,2%

* Abreviatura: 98/106= 98 aciertos de un total de 106 muestras.

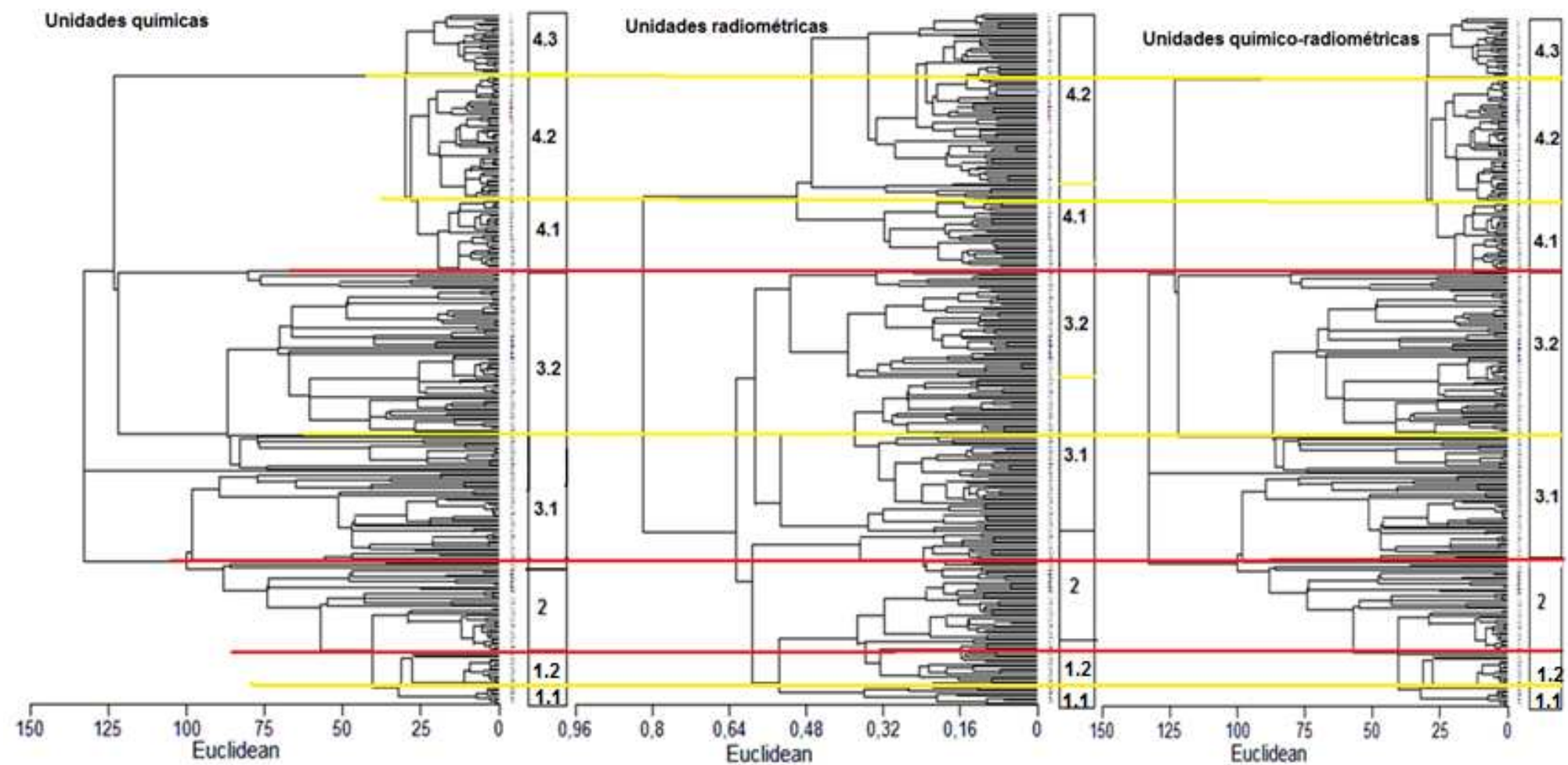


Figura 39. Comparación entre unidades químicas, radiométricas y químico-radiométricas generadas mediante el análisis de agrupaciones (dendrogramas) del pozo 6. Las líneas rojas y amarillas representan los límites de las unidades y sub-unidades respectivamente, definidas en base al método antes señalado.

7. DISCUSIÓN E INTERPRETACIONES GENERALES

7.1. COMPARACIÓN ENTRE LOS POZOS “BARQUISIMETO” (P-3) Y “CABUDARE” (P-6)

Mediante los diagramas de caja presentados en la figura 40, se visualiza la comparación de la composición química y radiométrica entre estos pozos. Cabe destacar que para la elaboración de estos diagramas se utilizaron todas las muestras de cada pozo, independientemente de la unidad químico-radiométrica en la que fueron clasificadas.

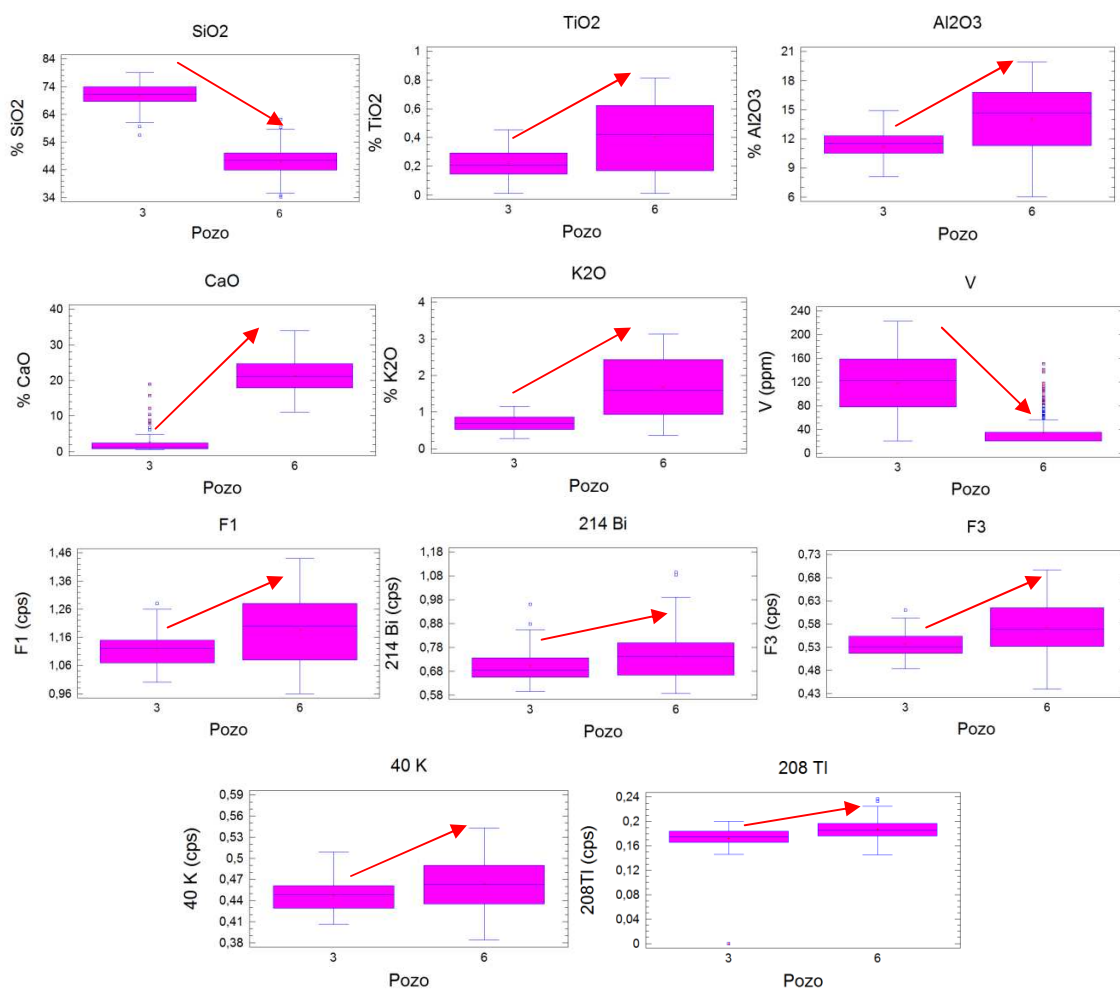


Figura 40. Diagramas de caja de variables químicas y radiométricas seleccionadas, la flecha roja indica el sentido del aumento o disminución de las variables entre los pozos de “Barquisimeto” y “Cabudare”.

Mediante la aplicación de la prueba estadística Z a las variables químicas presentadas en la figura 40, se observó que existe una diferencia estadística significativa para las variables SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , K_2O y V, entre los pozos de “Barquisimeto” y “Cabudare”. Esto se debe a que el valor de la prueba estadística Z es mayor de 2,329, que es el valor crítico para $\alpha=0,01$ que representa un 99% de confiabilidad (Apéndice 6).

Las diferencias más resaltantes son que, mientras la composición de SiO_2 , y V disminuyen drásticamente en el pozo 6 en relación al pozo 3; el contenido de CaO , Ti_2O , Al_2O_3 , K_2O aumenta en el pozo 6 respecto al pozo 3.

Para las variables radiométricas, la prueba estadística Z arrojó que las variables F1, F2 y ^{214}Bi presentan valores de $Z > 1,645$ ($\alpha=0,05$) lo que representa un 95% de confiabilidad (Apéndice 6) Es decir, que estas variables también presentan variaciones estadísticas significativas entre los pozos estudiados.

Lo anteriormente expuesto, permite inferir en primera instancia una fuente de sedimentos diferente para los sedimentos de los pozos estudiados. Siendo hacia la ciudad de Barquisimeto principalmente silíceo y hacia la ciudad de Cabudare más carbonático-arcilloso.

7. 2. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES

Siguiendo el procedimiento indicado en la sección 4.4, la definición de las unidades químico-radiométricas que se describirán a continuación fueron obtenidas mediante la observación de los perfiles de distribución de las variables químicas (figura 42), radiométricas (figura 43) y de color Munsell (figura 44), y comparados a las unidades provisionales obtenidas por análisis de agrupaciones (descritas en el Capítulo 6); dando como resultado unidades bien definidas unas de otras, siendo importante resaltar que por ambas metodologías (perfiles de distribución y métodos estadísticos), los resultados han sido coherentes.

7.2.1. Unidades en “Barquisimeto”

Para la definición de las unidades de estos pozos cabe señalar que, aunque en esta zona se analizaron dos pozos (pozo 1 y pozo 3), en el capítulo anterior (sección 6.3.) se discutió las diferencias y similitudes entre ellos. Concluyendo que las unidades existentes en ambos pozos son correlacionables entre sí, y que las mismas para efectos de comparación con el pozo de Cabudare, están mejor representadas en el pozo 3 debido a su mayor cantidad de muestras y mayor profundidad final.

Unidad Barquisimeto 1 (Bar-1)

Esta unidad tiene un espesor de 12 m, y se localizada entre la base del pozo (105 m) y los 93 m de profundidad. Esta es la unidad basal de “Barquisimeto” (figura 41).

Se caracteriza por poseer valores de SiO_2 entre 58 y 72%, valores de Al_2O_3 de 12% en promedio y valores de Fe_2O_3 de 4% en promedio.

A los 93 m de profundidad se aprecia en los perfiles químicos (figura 42) un pico negativo de los componentes TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O y V, junto a un pico positivo del SiO_2 que reflejan el cambio de composición del sedimento estudiado de arcilloso (unidad

Bar-2) a uno más bien arenoso-arcilloso, esta unidad se podría corresponder a la Formación Bobare, compuesta esencialmente de arenisca cuarzosa y lutita.

Unidad Barquisimeto 2 (Bar-2)

Esta unidad tiene un espesor de 21 m, y está localizada entre los 92 y 72 m de profundidad.

La unidad presenta valores homogéneos de SiO_2 de 72% en promedio, Al_2O_3 de 12% en promedio, Fe_2O_3 de 4% en promedio y de K_2O con 0,8% en promedio. La unidad posee los valores promedio más altos dentro del pozo de TiO_2 y Fe_2O_3 y V (figura 42), esto se asocia a la presencia de minerales de arcilla.

Los minerales de arcilla absorben iones de radioelementos pesados presentes en las aguas intersticiales derivadas del proceso de meteorización (SERRANO 2002), de allí que altos valores de radiactividad total (γ_{total}), parece indicar también la presencia de mayores concentraciones de minerales de arcilla.

La radiactividad total (γ_{total}) presente en la unidad disminuye hacia su base, lo que refleja cambios en el sedimento de arcilloso a arenoso (figura 43).

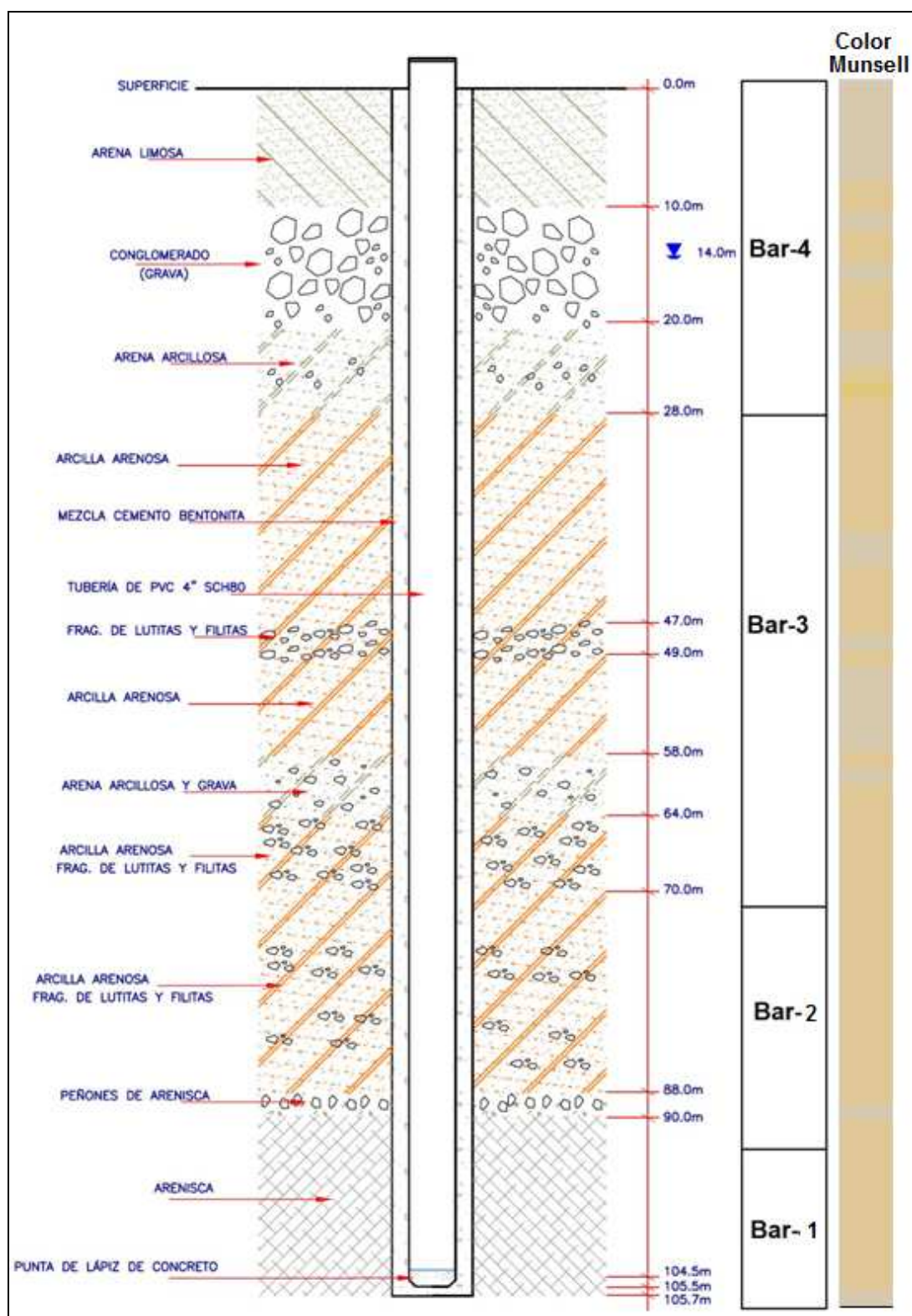


Figura 41. Columna estratigráfica de la perforación P-3 "Barquisimeto". A la derecha se muestran las divisiones de las unidades químico-radiométricas de "Barquisimeto", y el color Munsell de las muestras. Columna descriptiva tomada de GISCA (2006).

Unidad Barquisimeto 3 (Bar-3)

Esta unidad tiene un espesor de 44 m, y está localizada entre los 71 y 28 m de profundidad.

La unidad presenta valores de SiO_2 de 72% en promedio (siendo los más altos dentro del pozo como se muestra en la figura 42), Al_2O_3 de 12% en promedio, Fe_2O_3 de 4% en promedio y de K_2O con 0,8% en promedio. Esto aunado a valores altos de las relaciones $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, y γ_{total} se asocia a la presencia en la unidad de sedimentos principalmente arcillosos.

Sin embargo, entre los 58 y 65 m de profundidad (como se observa en las figuras 42, 43 y 44), los valores de Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , γ_{total} y la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ presentan una fuerte disminución respecto al resto de la unidad, mientras que el SiO_2 y la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ aumentan, esto se asocia a la presencia a ese nivel de una capa o lente de sedimentos principalmente arenosos.

La unidad se encuentra limitada en su tope por los picos negativos de TiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , K_2O , V.

La diferencia fundamental entre las unidades 2 y 3, ambas dominadas principalmente por sedimentos arcillosos se observa principalmente en la concentración de V, Fe_2O_3 y TiO_2 , siendo estas variables mayores en la unidad 2 (figura 42). El vanadio está principalmente asociado a la presencia de materia orgánica.

Unidad Barquisimeto 4 (Bar-4)

Esta unidad tiene un espesor de 28 m, localizada entre los 0 m y 28 m de profundidad. La unidad se caracteriza por poseer los valores promedios de SiO_2 más bajo (figura 42) alrededor del 69%. También presenta valores relativamente bajos de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , V

(4%, 3%, 0,4%, 50 ppm respectivamente). Sin embargo presenta una alta concentración de CaO (respecto al resto de las unidades).

La relación $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$ según HERRON (1988), nos da indicios sobre la cercanía de la fuente sedimentaria. La figura 44 muestra una alta relación de $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$, lo cual nos hace inferir que los sedimentos que conforman la unidad fueron depositados cerca a su fuente sedimentaria, esto aunado a una baja relación $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, refleja pocos cambios en la fuente sedimentaria (WINTSCH & KWALE 1994).

Valores altos de la relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ observados en la unidad indican que la misma está formada principalmente por sedimento arenoso que puede corresponderse a la unidad cuaternaria Q_1 (GIRALDO 1985), la cual está compuesta de conglomerado mal consolidado (de matriz arenosa) con intercalaciones de niveles arcillosos.

La alta proporción en CaO encontrado, refleja el contenido de material detrítico carbonático conspicuo en el área de Barquisimeto denominado caliche, el cual refleja condiciones de ambiente árido.

La unidad se encuentra limitada por el inicio del pozo en su tope y los quiebres de las tendencias de las variables SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , CaO, K_2O y V en su base (figura 42)

A continuación se presenta una tabla resumen (tabla 21) con las características e interpretaciones más importantes para cada unidad definida en Barquisimeto.

Tabla 21. Tabla resumen de las características de las unidades definidas en "Barquisimeto".

Unidad	Espesor (m)	Interpretación
Bar-4	28	La unidad está formada principalmente por sedimento arenoso que puede corresponderse a la unidad cuaternaria Q ₁ (GIRALDO 1985), compuesta de conglomerado mal consolidado (de matriz arenosa) con intercalaciones de niveles arcillosos. Además los niveles altos de CaO reflejan la probable influencia del caliche.
Bar-3	44	Los minerales de arcillosa son los que dominan la unidad, sin embargo entre los 58 y 65 m se observa un nivel arenoso.
Bar-2	21	Los minerales de arcillas dominan la unidad.
Bar-1	12	Se aprecia un cambio a sedimentos arcillosos de la unidad 2 y 3 a uno más bien arenosos-arcillosos correspondiente a la Formación Bobare, compuesta de arenisca y lutita.

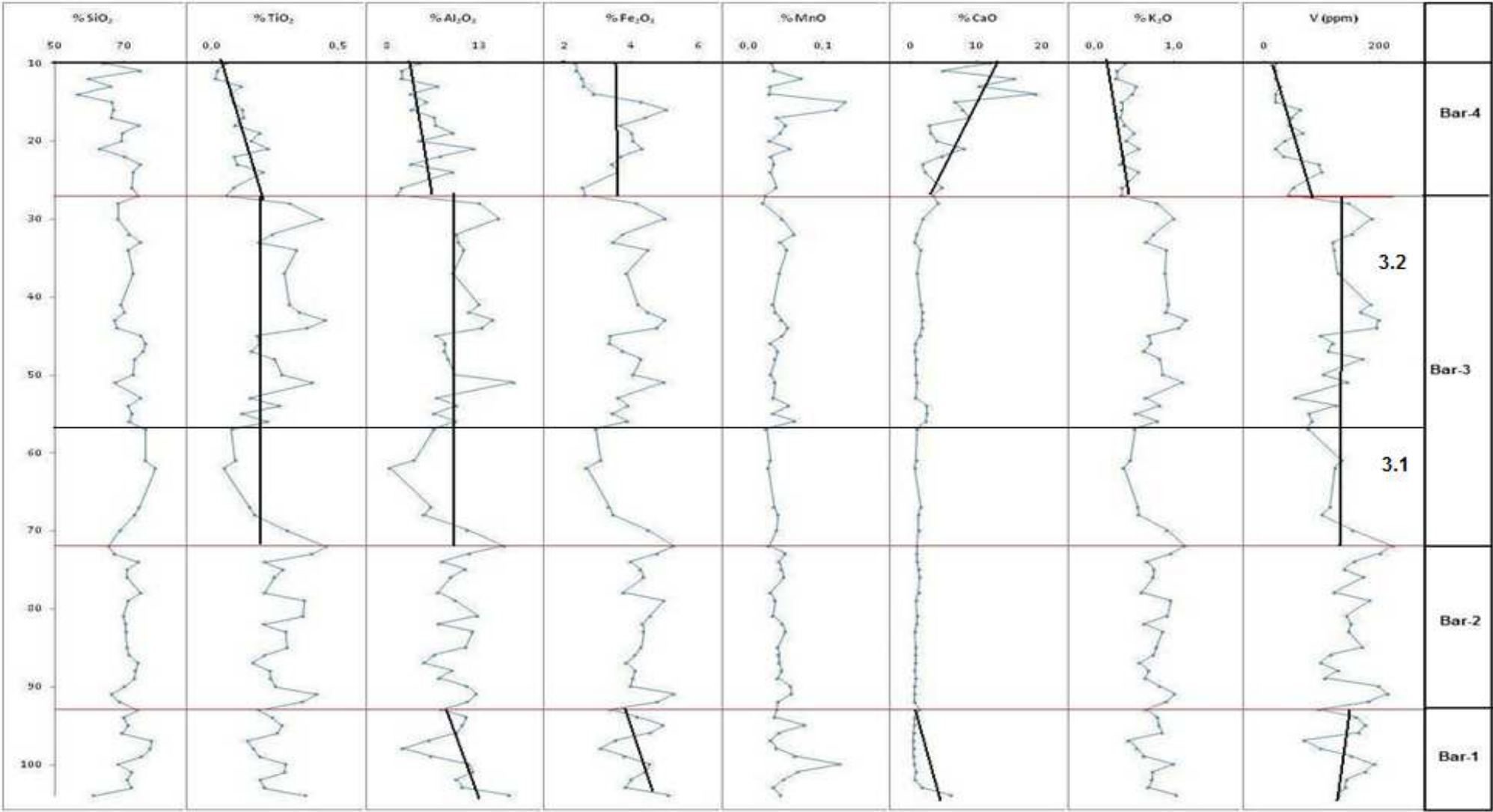


Figura 41. Perfil de distribución de variables químicas de “Barquisimeto”, las líneas rojas horizontales señalan los límites de las unidades químico-radiométricas definidas, las líneas negras horizontales señalan los límites de las sub-unidades, y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

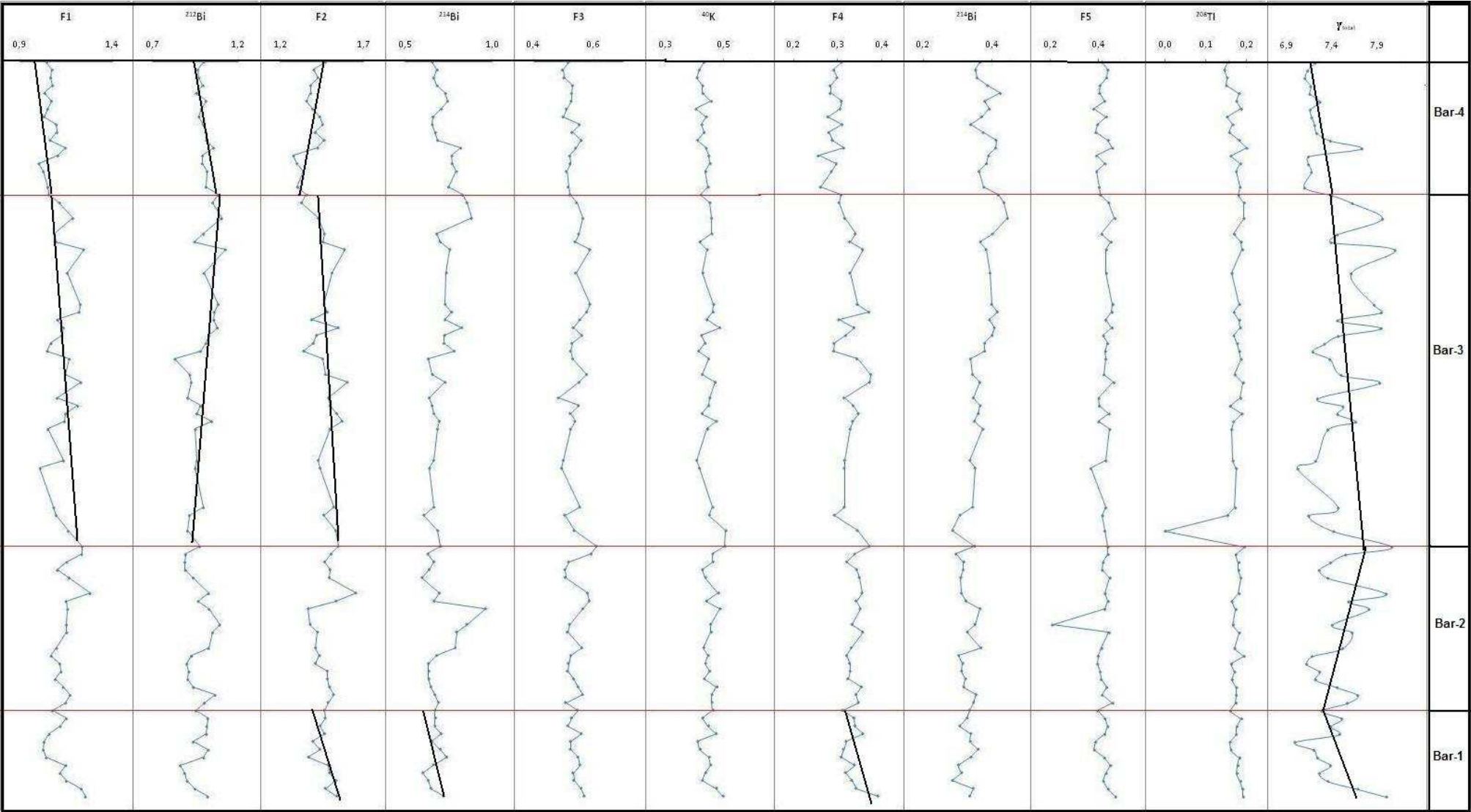


Figura 42. Perfil de distribución de variables radiométricas de “Barquisimeto”. Las líneas rojas horizontales señalan los límites de las unidades químico-radiométricas definidas, las líneas negras horizontales señalan los límites de las sub-unidades, y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

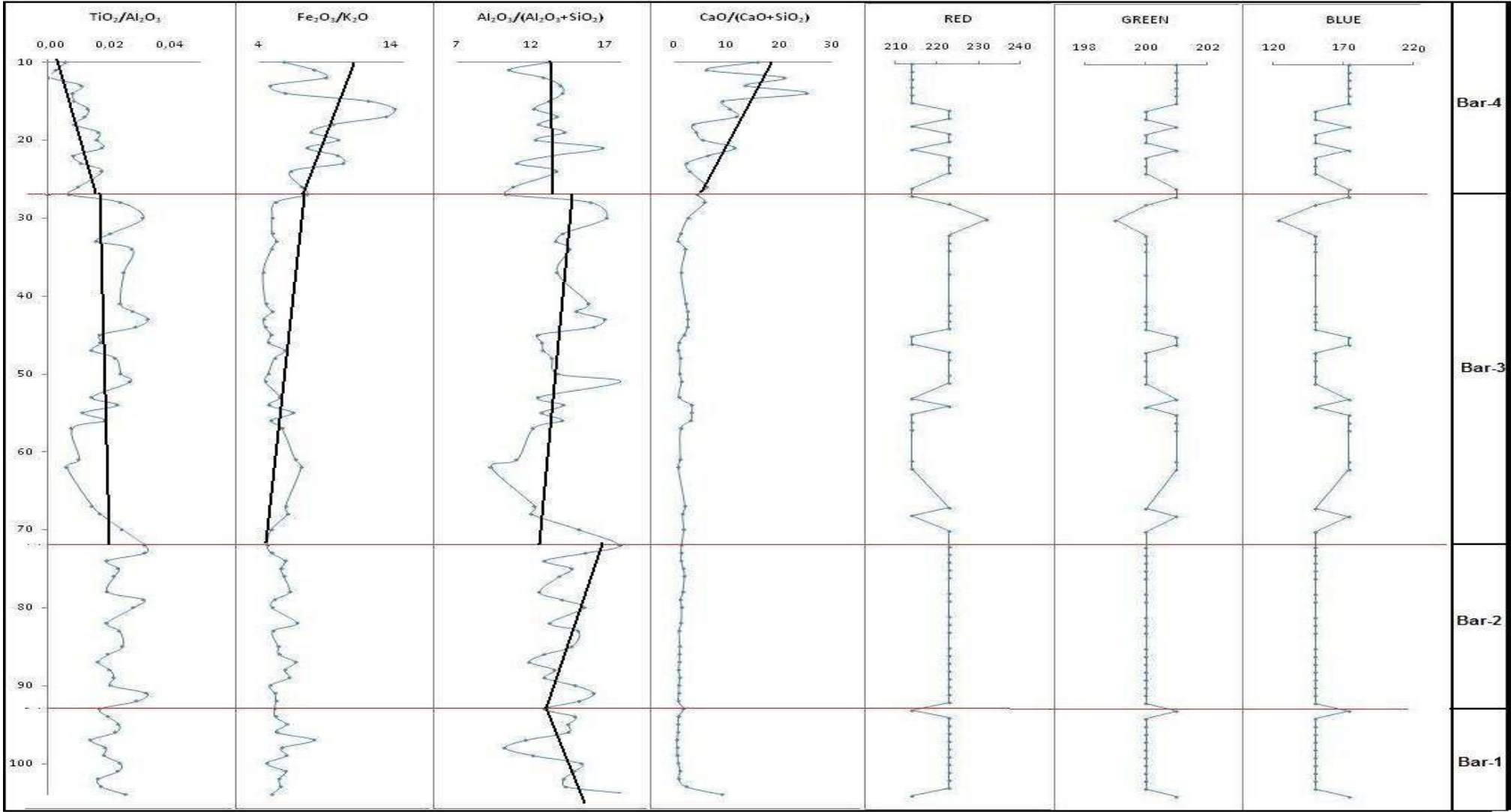


Figura 43. Perfil de distribución de color Munsell y relaciones químicas de “Barquisimeto”. Las líneas rojas horizontales señalan los límites de las unidades químico-radiométricas definidas, las líneas negras horizontales señalan los límites de las sub-unidades, y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

La figura 44 muestra los diagramas de caja comparativos entre las unidades descritas en “Barquisimeto”. Dichos diagramas fueron elaborados con las variables químicas y radiométricas del pozo.

Figura 45. Diagramas de caja para variables químicas y radiométricas seleccionadas del pozo “Barquisimeto”, para las cuatro unidades químico-radiométricas definidas en él

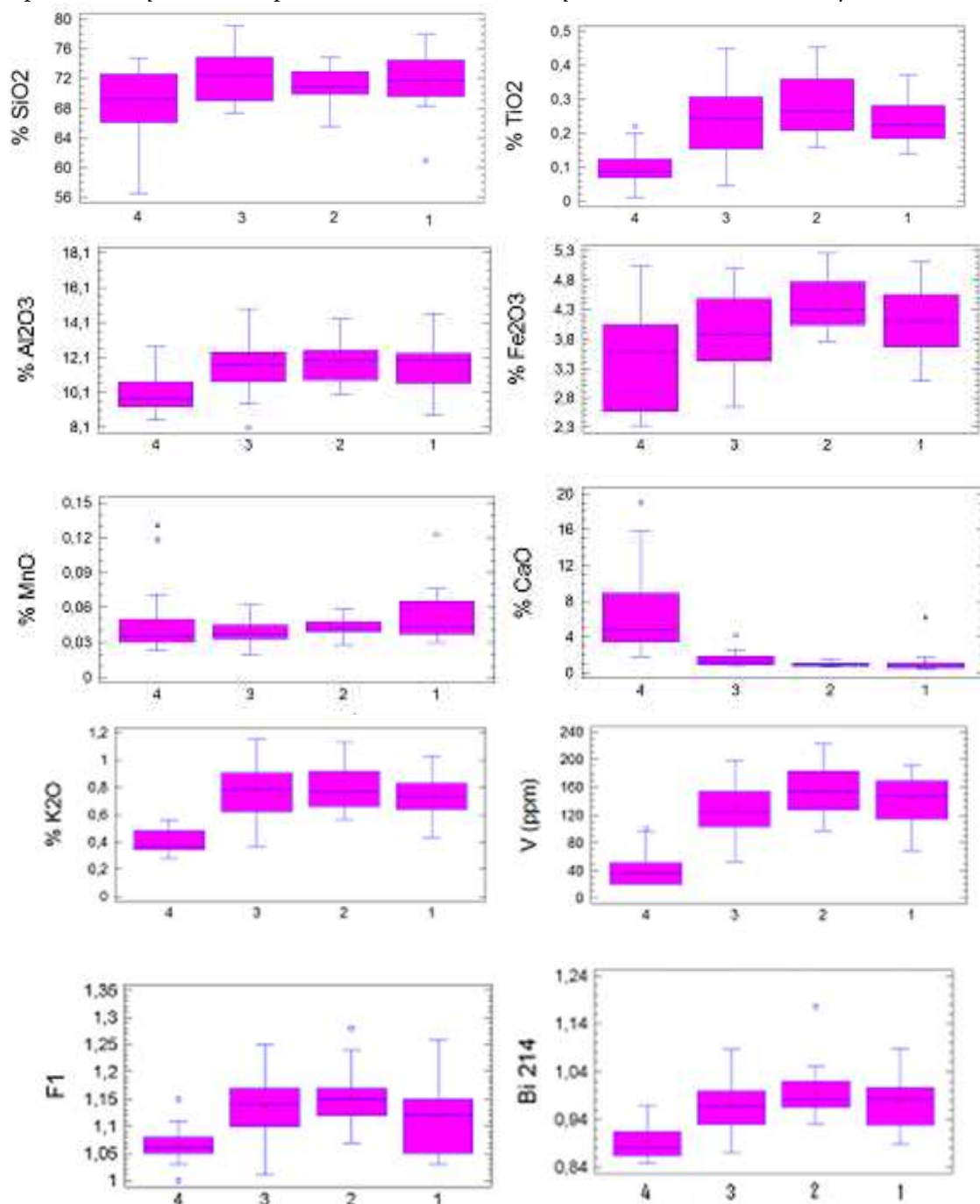
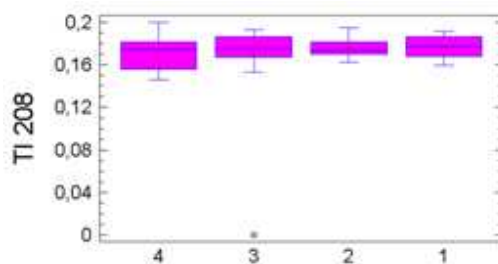


*Figura 45. Diagramas de caja de las variables químicas y radiométricas del pozo “Barquisimeto”, para las cuatro unidades químico-radiométricas definidas en él.
(Continuación).*



Los diagramas de caja muestran un comportamiento homogéneo para las unidades 1, 2 y 3, y un quiebre importante respecto a la unidad 4. Por ello se utilizó la prueba Z, con el fin de comparar estadísticamente las unidades 3 y 4. La prueba arrojó que las variables SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O y V presentan variaciones significativas entre dichas unidades. Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en el Apéndice 6.

7.2.2. Unidades de Cabudare

Unidad Cabudare 1 (Cab-1)

Esta unidad presenta 25 m de espesor, y sus límites se ubican entre los 275 m y los 300 m de profundidad. La unidad atraviesa el basamento rocoso según GISCA (2006) a los 285 m de profundidad, lo cual coincide con los límites de la sub-unidad estadística “Cabudare 1.1” definida en el Capítulo 6 (figura 49). La unidad se caracteriza por presentar los valores de SiO_2 más bajos dentro del pozo con 42%, en promedio (figura 46). El TiO_2 presenta valores entre 0,2 y 0,5%, el Fe_2O_3 oscila entre 3 y 5%, el K_2O se ubica entre 1 y 2%. El contenido de CaO se ubica entre 25 y 35%, siendo el mayor dentro del pozo.

Los valores de SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , ^{214}Bi presentan una clara tendencia a disminuir hacia la base, caso contrario a los valores de CaO que aumentan considerablemente hacia la base de la unidad (figuras 46 y 47). Lo anteriormente expuesto nos permite inferir un cambio litológico de minerales arcillosos-arenosos, presentes hacia el tope de la unidad, a minerales más bien carbonáticos pertenecientes al Esquisto de Mamey (unidad “Cabudare 1.1”).

El límite superior de la unidad está definido por una tendencia quiebre en la tendencia de distribución de las variables F1 , ^{214}Bi , F2 , ^{212}Bi , ^{208}Tl , γ_{total} y V . (figuras 47 y 48)

Unidad Cabudare 2 (Cab-2)

Esta unidad presenta 39 m de espesor y se ubica entre los 236 y 274 m de profundidad. La unidad se caracteriza por presentar valores de SiO_2 de 44% en promedio, igualmente la unidad presenta los valores máximos de K_2O y Fe_2O_3 dentro del pozo con 2,5 % y 4,5%, respectivamente.

Se observó una alta relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ (figura 48) lo cual señala la presencia de arcillas. Además la tendencia de aumento hacia la base del CaO , a pesar de que la

radiactividad natural, el K_2O , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , y SiO_2 tienden a disminuir hacia la base. Indica que si bien la unidad está compuesta principalmente por arcillas, las mismas disminuyen hacia la base, en detrimento de minerales más carbonáticos.

El límite superior de la unidad se encuentra marcado por los quiebres en las tendencias de distribución de las variables TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , γ_{total} , TiO_2/Al_2O_3 , observados en las figuras 46 a 48.

Unidad Cabudare 3 (Cab-3)

Esta unidad es la de mayor espesor con 124 m, la misma se ubica entre los 113 y los 235 m de profundidad. La unidad se caracteriza por valores promedios de SiO_2 de 48%, valores de CaO bajos alrededor de 18%, (figura 46) y contenidos de V, K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 , ^{214}Bi y ^{40}K con 80 ppm, 2%, 4,5%, 0,5%, 1,1cps y 0,35csp respectivamente. La concentración de Al_2O_3 con un promedio de 17%, es la mayor dentro del pozo (figura 46).

Esta unidad presenta la mayor concentración de TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , V, F1, F2, F3, F4, F5, ^{214}Bi , ^{40}K , ^{208}Tl y γ_{total} en relación con las unidades adyacentes.

Se observa una clara tendencia de aumento hacia la base de las variables TiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , Al_2O_3 , V, ^{214}Bi y γ_{total} , mientras que el contenido de SiO_2 disminuye hacia la base (figuras 46 y 47).

Lo anteriormente expuesto se interpreta como un aumento de la cantidad de arcillas presentes hacia la base de la unidad (sub-unidad estadística “Cabudare 3.1”, definida en el Capítulo 6), en detrimento de las arenas y gravas. Se infiere un intervalo de amplia presencia de arcillas entre los 220 y 235 m de profundidad. Además el V se puede asociar a material orgánico (principalmente raíces encontradas en las muestras durante el proceso de pulverizado).

La relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ baja (figura 48), confirma la existencia de un sedimento de grano fino (arcilla) en la unidad, esto es confirmado mediante la observación de la columna estratigráfica (figura 49) elaborada por GISCA (2006).

El límite superior de la unidad se encuentra marcado por un abrupto cambio en la tendencia de la mayor parte de las variables químicas y radiométricas analizadas. Esto se muestra en las figuras 46 a 48.

Unidad Cabudare 4 (Cab-1)

Esta unidad es la más superficial de Cabudare, presenta un espesor de 111 m y se ubica desde 1 m hasta los 112 m de profundidad. Se caracteriza por presentar los valores de SiO_2 más altos dentro del pozo con 50% en promedio (figura 46). Los valores de TiO_2 , Al_2O_3 , y Fe_2O_3 , son los más bajos dentro del pozo con promedios de 0,2%, 10% y 3,5%. El contenido de CaO se ubica en 23%. Cabe destacar los valores de las variables químicas y radiométricas en general son constantes u homogéneos en toda la unidad.

La baja cantidad de γ_{total} , aunado a la alta relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ indica que los sedimentos presentes en esta unidad son de grano grueso (arenas y gravas). Esto se confirma mediante la observación de la columna estratigráfica (figura 49) realizada por GISCA (2006).

La relación $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$ en esta unidad es alta (figura 48), lo cual indica que los 111 m de sedimentos compuestos principalmente por arena y grava que conforman la unidad están cercanos de su roca fuente. A diferencia de las unidades Bar- 2, Bar-3 y Bar-4, en las cuales dicha relación es baja.

El alto contenido de CaO observado en la unidad se puede atribuir a fragmentos de calcita y/o rocas carbonáticas observados en las gravas (durante la pulverización de las muestras), además del efecto de un mineral carbonático detrítico denominado caliche el cual es conspicuo en el área.

A continuación se presenta una tabla resumen (tabla 22) con las características e interpretaciones más importantes para cada unidad definida en Cabudare.

Tabla 22. Tabla resumen de las características de las unidades definidas en “Cabudare”.

Unidad	Espesor (m)	Interpretación
Cab-4	113	Sedimentos compuestos principalmente por arena y grava que conforman la unidad están cercanos de su roca fuente. Asimismo se observa influencia de CaO atribuida a clastos de calcita y al posible efecto del caliche.
Cab-3	124	Intervalo de amplia presencia de arcillas entre los 160 y 235 m de profundidad
Cab-2	39	La unidad está compuesta principalmente por arcillas, las mismas disminuyen hacia la base, en detrimento de minerales más carbonáticos.
Cab-1	25	Cambio litológico de minerales arcillosos-arenosos, presentes hacia el tope de la unidad, a minerales más bien carbonáticos pertenecientes al Esquisto de Mamey.

La figura 50 muestra los diagramas de caja comparativos entre las unidades de Cabudare que serán descritas a continuación, los mismos fueron generados con variables químicas y radiométricas.

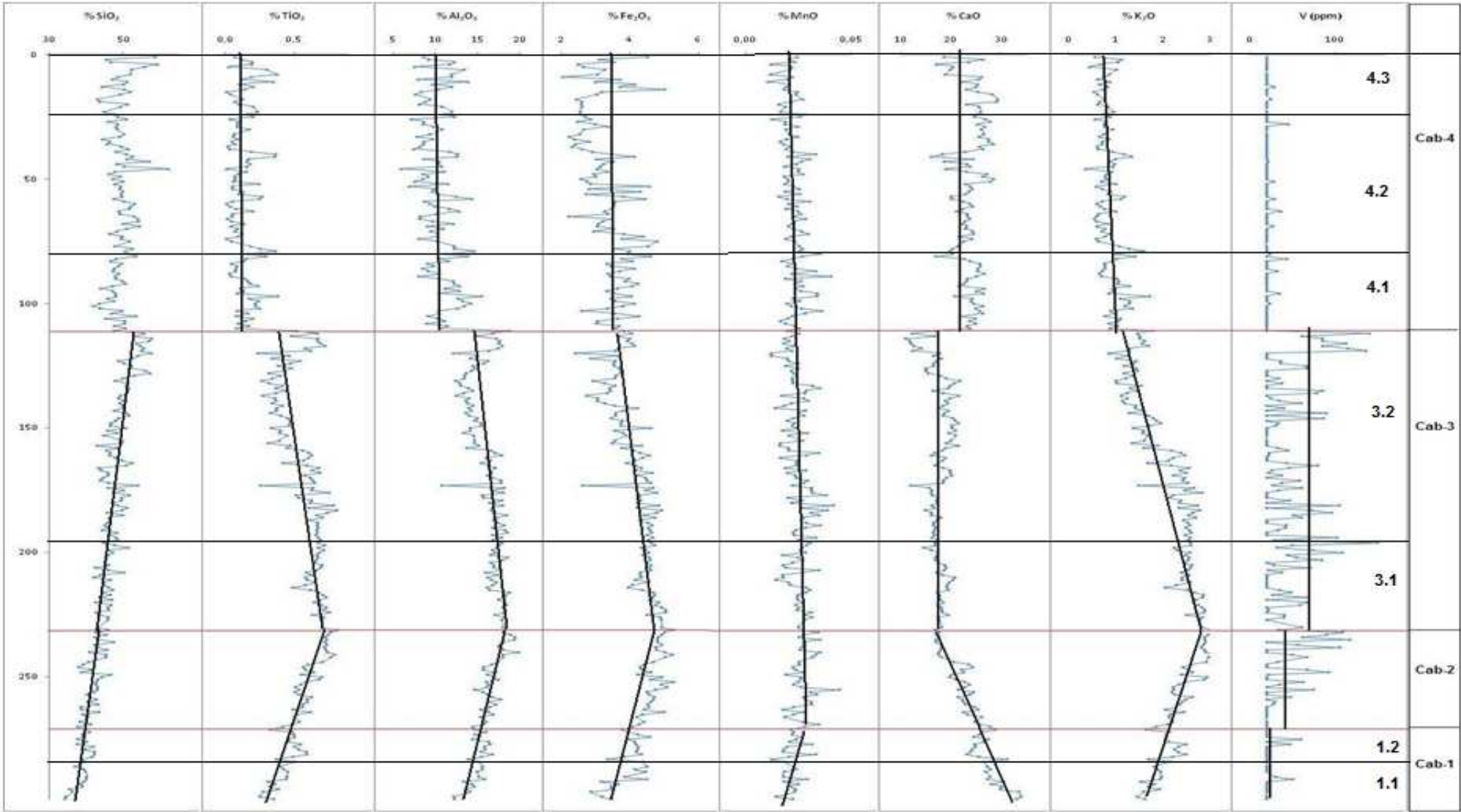


Figura 46. Perfil de distribución de las variables químicas de “Cabudare”. Las líneas rojas muestran los límites de unidades y las líneas negras horizontales los límites de sub-unidades y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

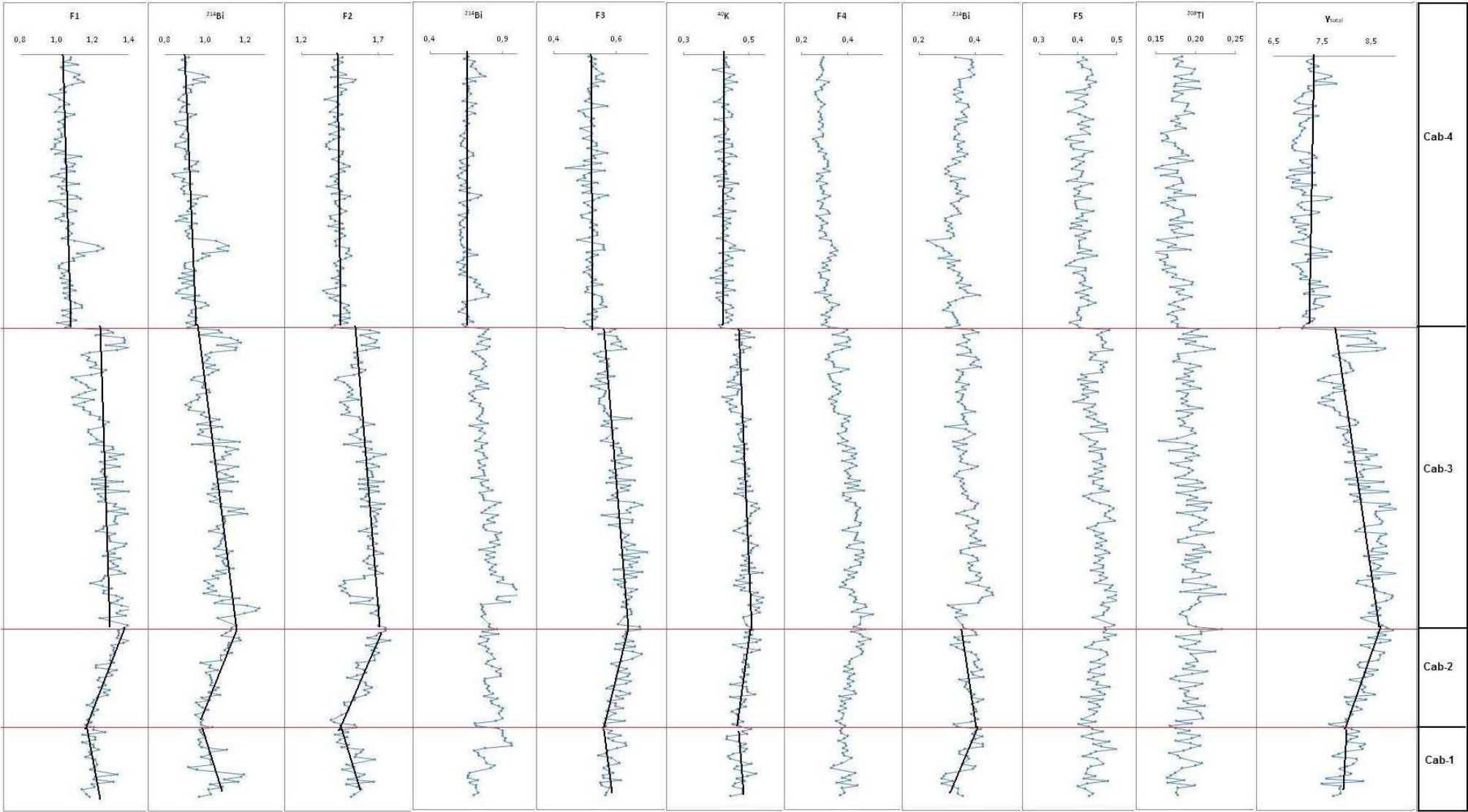


Figura 47. Perfil de distribución de las variables radiométricas de “Cabudare”. Las líneas rojas muestran los límites de unidades y las líneas negras horizontales los límites de sub-unidades y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

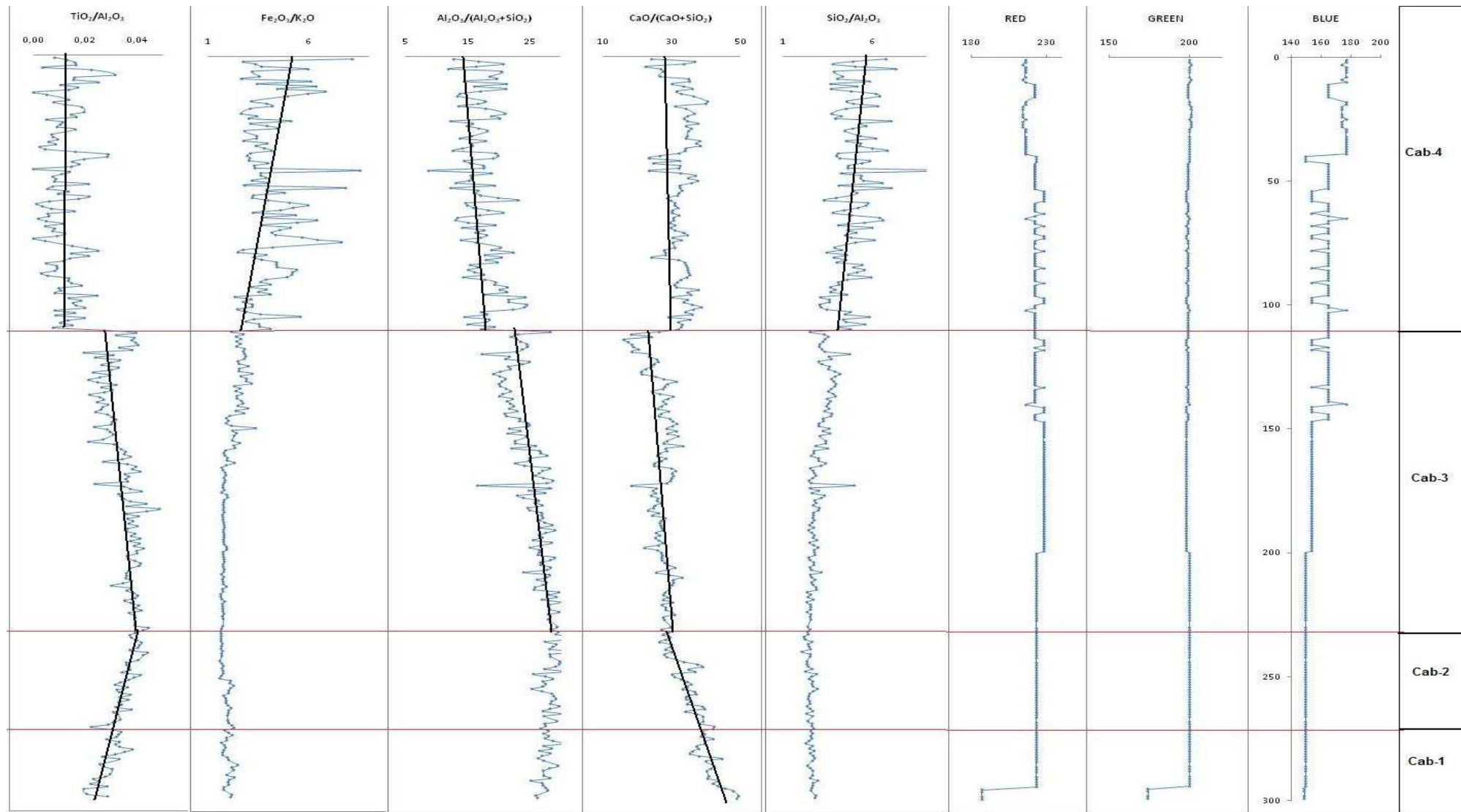


Figura 48. Perfil de distribución del color Munsell y las relaciones químicas de “Cabudare”. Las líneas rojas muestran los límites de unidades y las líneas negras horizontales los límites de sub-unidades y las líneas verticales marcan la tendencia de distribución de las variables.

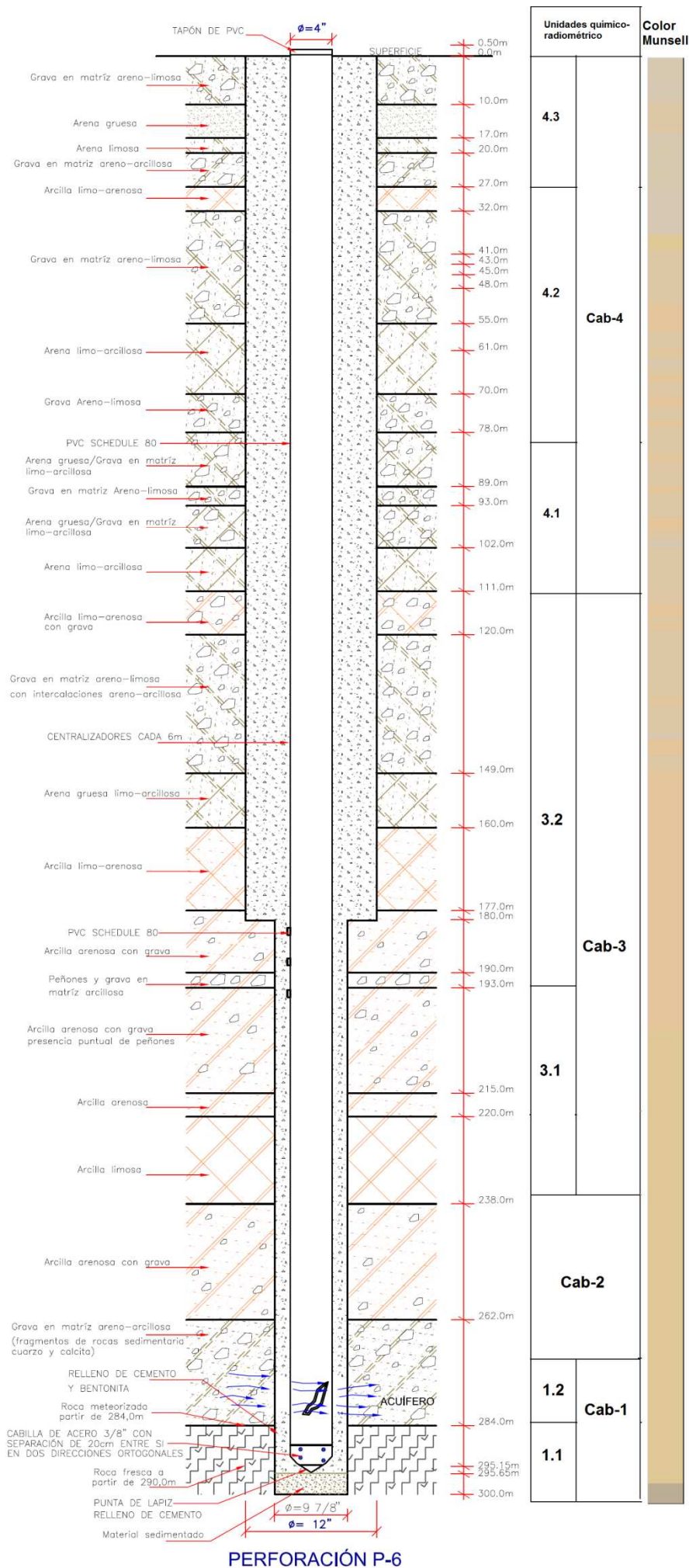


Figura 49. Columna estratigráfica del pozo de Cabudare. A la derecha se muestra el color Munsell. Tomado de GISCA (2006).

Figura 50. Diagramas de caja de las variables químicas y radiométricas de las unidades definidas en el pozo “Cabudare”

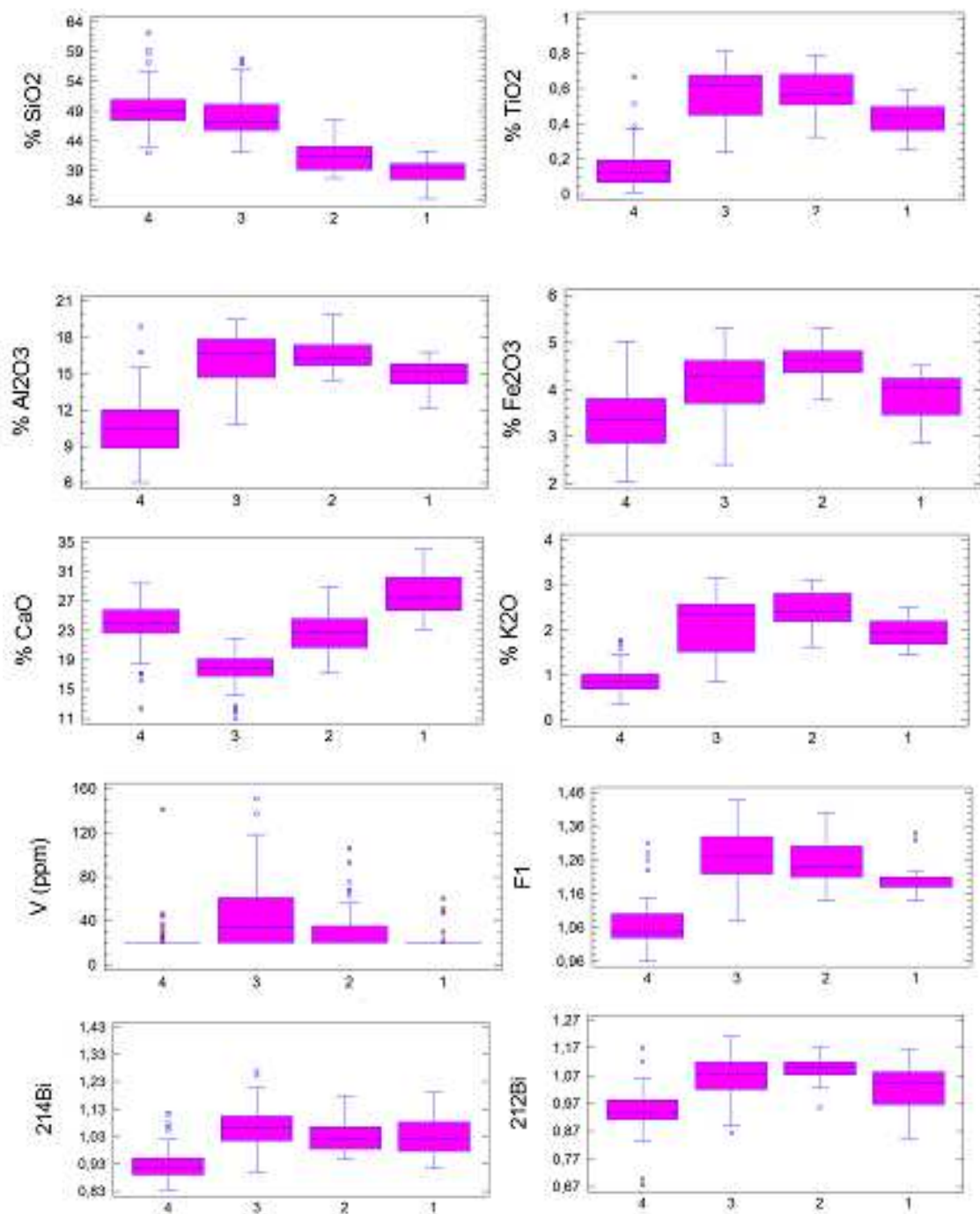
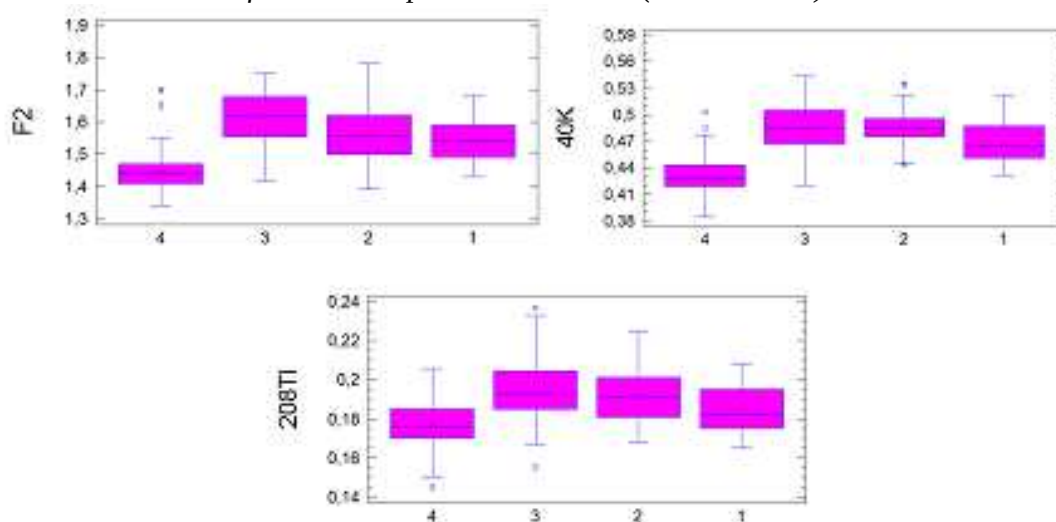


Figura 50. Diagramas de caja de las variables químicas y radiométricas de las unidades definidas en el pozo “Cabudare” (continuación)



Los diagramas de caja (figura 50) muestran gráficamente que la unidad 4 presenta diferencias con las unidades 1, 2 y 3 las cuales son más similares entre sí. Debido a esto, se utilizó la prueba estadística Z, para determinar si estas diferencias observadas en los diagramas son estadísticamente significativas. La prueba arrojó que las variables SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , V, F1, ^{214}Bi , ^{212}Bi , F2, ^{214}Bi , F3, ^{40}K , F4, F5, ^{208}Tl presentan variaciones significativas entre las unidades 3 y 4 (Apéndice 6).

7.3. AMBIENTES Y CICLOS SEDIMENTARIOS

A pesar de la cercanía entre los pozos de Barquisimeto y Cabudare aproximadamente 12,5 km entre ellos, es de hacer notar las diferencias que existen entre ellos siendo la principal que ellas se ubican en lados opuestos de la Falla de Boconó, la cual atraviesa el área en sentido NE. Esto origina que la región se divida en dos provincias una meridional y otra septentrional, estando la primera caracterizada por afloramientos de rocas metamórficas y la segunda por afloramientos de rocas sedimentarias (ver figura 5). Aunado a esto al sur de Cabudare se ubica una traza paralela a la Falla de Boconó la cual generó la Cuenca de Tracción de Cabudare, depositándose en ella hasta 400 m de espesor sedimentario Plio-Cuaternario (AUDEMARD & GIRALDO 1997).

Estas diferencias motivaron a realizar el análisis de los posibles ciclos sedimentarios por separado de la secuencia sedimentaria en cada ciudad.

Pozo “Barquisimeto”

Mediante la integración de las unidades químicas-radiométricas definidas en la sección anterior, además de la comparación de la litología de la columna descriptiva de GISCA (2006), con literatura geología existente de la zona, se interpreta que la unidad Barquisimeto 4 (Bar-4, la más superficial) se corresponde a la unidad cuaternaria Q_1 de GIRALDO (1985), la cual consta de conglomerado poco consolidado con matriz arenosa, e intercalaciones de arcilla, lo cual también se observó en la columna de GISCA. En los pozos analizados se observó que esta unidad presenta un espesor de 28 m (figura 51).

La unidad 3.2 de “Barquisimeto” se interpreta como perteneciente a la unidad cuaternaria de Giraldo Q_2 , la cual está compuesta de conglomerado con cemento carbonático. Sin embargo el perfil de distribución químico de la variable CaO (asociada al carbonato) en esta sub-unidad, presenta valores bajos de CaO para esta unidad. Según BUSHMAN (1965), la formación de caliche en el área de Barquisimeto-Cabudare es originada en parte al movimiento ascendente de agua rica en Ca que se deposita en la

superficie (Unidad Q₁) causando esto una disminución o empobrecimiento de la concentración de CaO en la unidad Q₂, y enriqueciendo la unidad suprayacente Q₁, que si presenta alto contenido de CaO.

Así mismo se plantea que las unidades Barquisimeto 3.1 y 2 (Bar-3.1 y Bar-2) se corresponden a la unidad Q₃ de GIRALDO (1985), la cual se compone de conglomerados con intercalaciones de arena y arcilla (figura 51). Se determinó que el espesor de esta unidad en el pozo de “Barquisimeto” es de 25 m, siendo este valor menor al espesor máximo estimado por BECHTOLD (2004), de 80 m.

Finalmente la unidad más basal de Barquisimeto la Bar-1 se asocia a la Formación Bobare, sin embargo BECHTOLD (2004) plantea que dadas las irregularidades del relieve de los alrededores de Barquisimeto, se infiere que el paleorelieve debajo de la terraza formado por las Napas de Lara, es también de gran irregularidad, lo que implica que probablemente las formaciones debajo de la terraza pueden variar lateralmente y no necesariamente deben pertenecer a únicamente a la Formación Bobare.

Es importante señalar que la columna descriptiva (figura 51) elaborada por GISCA (2006), indica que el comienzo de la roca fresca ocurre a los 90 m de profundidad, sin embargo mediante la observación de los perfiles de distribución de las variables químicas y radiométricas y el uso de las unidades estadísticas obtenidas en el Capítulo 6, se determinó que el cambio litológico sedimentos Q₃ a rocas de la Formación Bobare, ocurre con más exactitud a los 93 m de profundidad.

Como fue descrito en la sección 2.4, GIRALDO (1985) subdivide el Cuaternario de Barquisimeto y sus alrededores en cuatro unidades (Q₁, Q₂, Q₃, Q₄), e introduce la hipótesis que los sedimentos fueron depositados durante períodos glaciales debido a menos vegetación con lluvia concentrada en eventos extremos. Según esta hipótesis, las edades mínimas de los cuatro unidades son: Q₁: 0,01 Ma.; Q₂: 0,4 Ma.; Q₃: 0,95 Ma.; Q₄: 1,7 Ma.

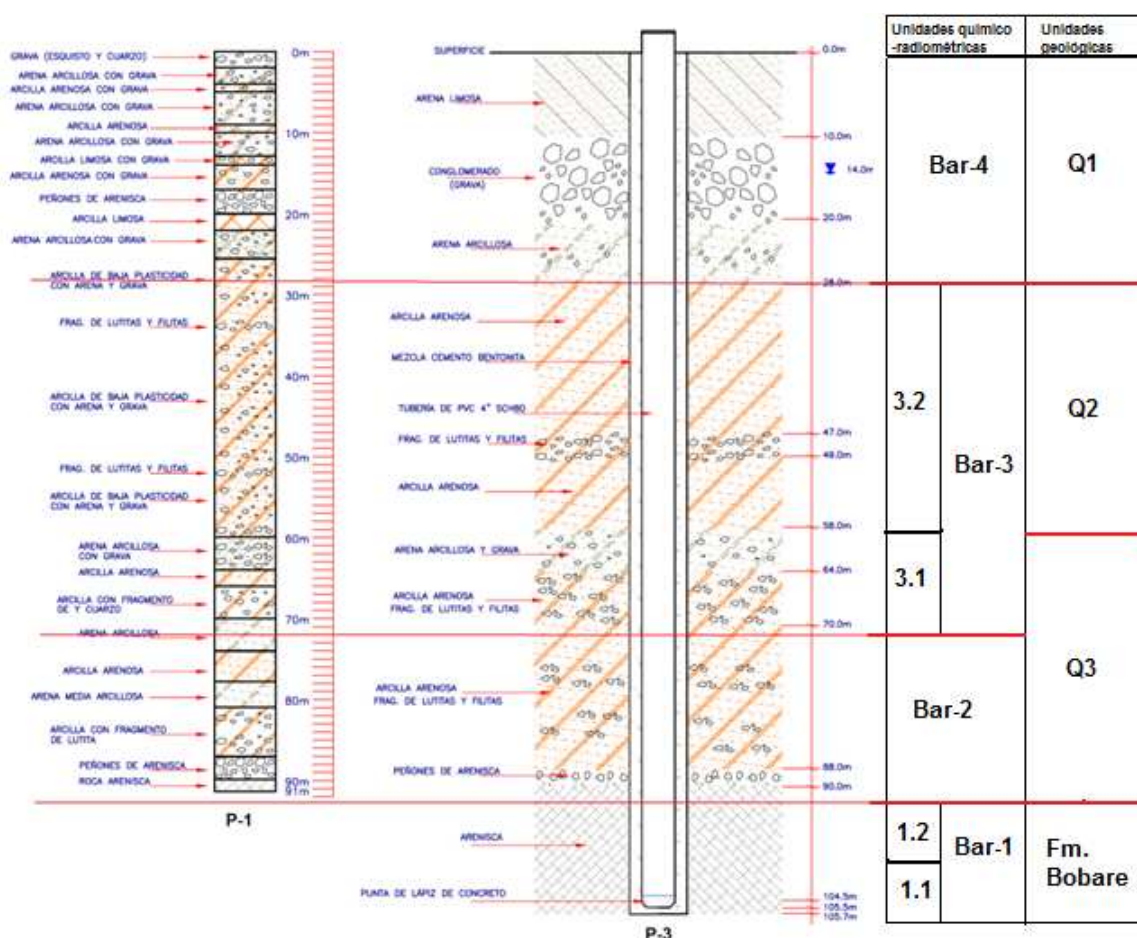


Figura 51. Columna descriptiva de pozos de Barquisimeto. Se muestra la correspondencia de las unidades químicas-radiométricas generadas en el presente trabajo y con unidades geológicas asociadas. Las líneas rojas verticales indican los límites de las unidades.

Esto nos permite interpretar para el área de Barquisimeto al menos 3 ciclos sedimentarios cuaternarios importantes caracterizados de tope a base, por los sedimentos Q₁, Q₂, Q₃, siendo las edades mínimas de los ciclos cuaternarios según GIRALDO (1985) de 0,01 0,4 y 0,95 Ma respectivamente. El basamento rocoso se interpreta como perteneciente a la Formación Bobare de edad Cretácico Temprano.

La presencia de alta concentración de CaO en la unidad más superficial de “Barquisimeto” Bar-4 (Q₁) puede estar asociado principalmente a la presencia de caliche, estando a su vez el caliche asociado a climas áridos.

BEARD *et al.* (1982) realizaron estudios sobre paleoclimas, secuencias depositacionales y ciclos eustáticos en el Cuaternario, presentando dichos ciclos asociados con la temperatura en los últimos 100 mil años. En ella se le asocian los períodos de climas húmedos y secos a las variaciones del ciclo eustático.

Considerando que debido a la mayor presencia de caliche se atribuye mayormente a climas secos, se estima que la concentración de CaO, puede utilizarse en forma aproximada para efectos de interpretaciones paleoclimáticas, de ahí que mediante la comparación de la concentración de CaO en “Barquisimeto”, se grafica una posible respuesta aproximada de las concentraciones de CaO (figura 52).

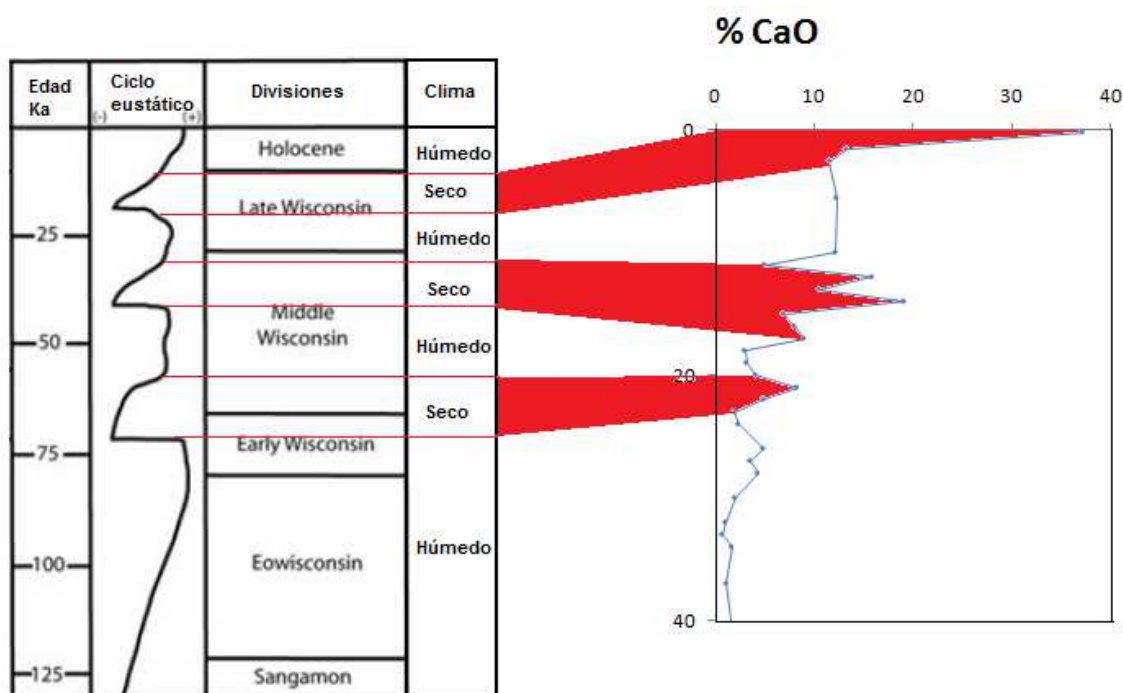


Figura 52. Comparación entre los ciclos eustáticos propuestos por BEARD *et al.* (1982), y la concentración de CaO de los 40 m más superficiales de “Barquisimeto”.

Pozo “Cabudare”

Integrando las unidades químicas-radiométricas definidas en secciones anteriores, además de la litología observada en la columna descriptiva (figura 53), con la literatura geología existente de la zona se lograron las cuatro unidades definidas.

La unidad más superficial Cabudare 4 (Cab-4), se puede correlacionar con las unidades cuaternarias de GIRALDO (1985) Q_1 en su tope, Q_2 hacia su centro y Q_3 en su base (ver figura 53).

Según GIRALDO (1985) la unidad Q_1 está compuesta de conglomerado poco consolidado con una matriz de arena intercalaciones de arcilla, la unidad Q_2 se caracteriza por conglomerado con cemento carbonático y la unidad Q_3 se compone de conglomerado con intercalaciones de arena y arcilla. Estas litologías son coherentes con lo observado durante la etapa de preparación de muestras y son similares a las presentadas en la columna descriptiva de GISCA (2006).

En este pozo la unidad Q_1 presenta 25 m de espesor, la unidad Q_2 presenta 58 m de espesor y la unidad Q_3 presenta 29 m de espesor. La división entre ellas se corresponde con los límites de las unidades estadísticas del pozo de “Cabudare” (P-6) “4.1”, “4.2” y “4.3”, definidos en el Capítulo 6, y que son mostrados en la figura 53.

Los límites entre estas unidades se ubican a los 25 y 83 m de profundidad, estando señalados por un pico en las tendencias de distribución de las variables químicas y radiométricas (figuras 46 y 47), sin embargo como éstas unidades en conjunto tienen una tendencia común entre los 1 y 112 m, son agrupadas bajo la misma unidad químico-radiométrica (“Cabudare 4”). Como fue mencionado anteriormente las edades mínimas según GIRALDO (1985) de las unidades Q_1 , Q_2 y Q_3 son 0,01 Ma, 0,4 y 0,95 Ma, respectivamente, lo que define al menos 3 ciclos sedimentarios cuaternarios.

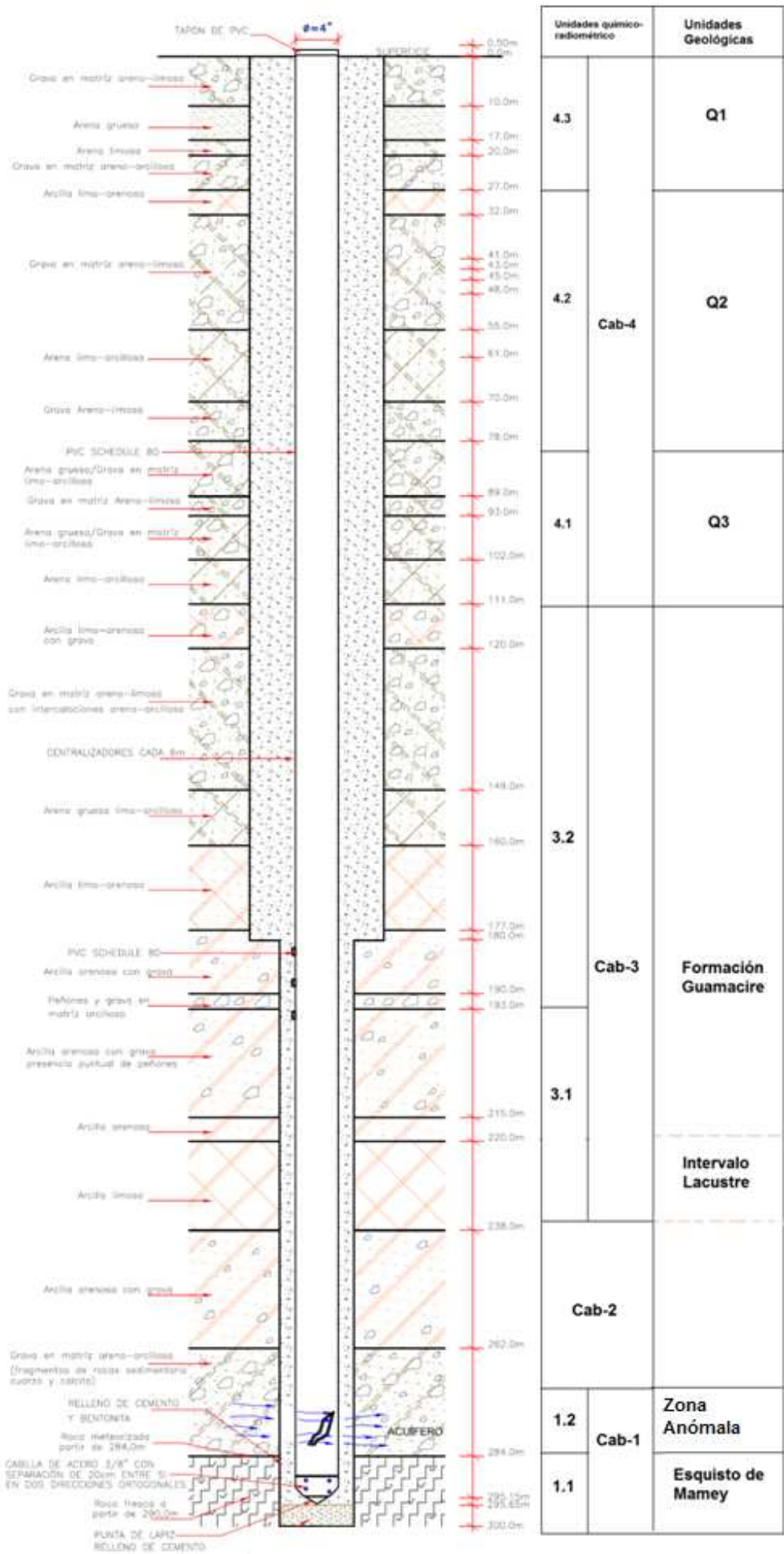


Figura 53. Columna estratigráfica del pozo de Cabudare. Hacia la derecha se encuentran en la columna las unidades químicas-radiométricas generadas en el presente trabajo y las unidades geológicas asociadas. Tomado de GISCA (2006).

El límite inferior de la unidad Cabudare 4, está señalado por un cambio abrupto en la concentración de casi todas las variables analizadas, lo que indica un gran cambio en las condiciones sedimentarias predominantes en la región.

Las unidades Cabudare 3 y Cabudare 2 (Cab-3, Cab-2), fueron interpretadas pertenecientes a la Formación Guamacire (BUSHMAN 1965), compuesta de arcilla y conglomerado. Sus límites se ubican entre los 112 m y los 274 m de profundidad, logrando un espesor de 162 m, coincidiendo esto con planteado por BUSHMAN (1965), que indica un espesor mínimo de 100 m.

Los sedimentos arcillosos encontrados entre los 220 y 240 m de profundidad, observados en la figura 53 y reflejados en los perfiles de distribución químicos radiométricos (figuras 46 y 47), sugieren la existencia de un ambiente posiblemente lacustre ligado a la acción (subsistencia) de la Cuenca de Tracción de Cabudare. Igualmente estos sedimentos se asocian a los episodios iniciales de la apertura de la Cuenca de Tracción de Cabudare.

La unidad Cabudare 1, se asocia en su tope (sub-unidad 1.2) con la presencia de una zona “anómala”, debido a la presencia de un acuífero con un flujo grande y continuo de agua hacia los 281 m de profundidad (ver figura 53). Hacia la base de Cabudare 1 (sub-unidad 1.1) se correlaciona con el esquisto cuarzo- sericítico de Mamey.

En resumen, en “Cabudare” se encontraron 4 ciclos sedimentarios. Tres asociados a los sedimentos cuaternarios Q_1 , Q_2 , Q_3 , uno asociado a la depositación de la Formación Guamacire de edad Plioceno, siendo el basamento rocoso interpretado como perteneciente al Esquisto de Mamey, de edad Cretácico Temprano.

La tabla 23, muestra una comparación entre las unidades cuaternaria de GIRALDO (1985) asociadas a las unidades químico-radiométricas definidas en el presente trabajo. De ella se puede observar en primera instancia la similitud química y litológica que existe entre la Unidad Q_1 , tanto en “Barquisimeto”, como en “Cabudare”.

Respecto a la unidad Q₂, se tiene que la misma es más arcillosa hacia “Barquisimeto”, y la misma presenta menor contenido de CaO respecto a lo observado en “Cabudare”. Esto se debe en primera instancia a las diferentes fuentes sedimentarias que tienen ambos pozos, siendo hacia “Cabudare” mas carbonático y hacia “Barquisimeto” mas silíceo; y en segundo lugar a que tanto en “Barquisimeto” como en “Cabudare” el caliche es conspicuo y para su generación según BUSHMAN (1965), además de climas secos o áridos, se necesita el movimiento ascendente de aguas ricas en Ca que se depositen en la superficie, causando esto una disminución o empobrecimiento de la concentración de CaO en la unidad Q₂, y enriqueciendo la unidad suprayacente Q₁.

En cuanto al espesor sedimentario, según lo interpretado se tiene que en “Cabudare” la unidad Q₂ presenta mayor espesor, lo que indica que probablemente durante su desarrollo (aproximadamente 0,4 Ma) la Cuenca de Tracción de Cabudare estuvo en un régimen de subsidencia.

Tabla 23. Comparación entre unidades encontradas en Cabudare y Barquisimeto

Unidad geológica interpretada	Espesor de sedimentos (m)		Litología observada		Cercanía de fuente sedimentaria (relación Fe ₂ O ₃ / K ₂ O, HERRON 1988)	
	Barquisimeto	Cabudare	Barquisimeto	Cabudare	Barquisimeto	Cabudare
Q ₁	28	25	Arena y grava con alto CaO	Arena y grava con alto CaO	Cerca	Cerca
Q ₂	26	58	Grava y arcillas con bajo CaO	Arena, grava y arcillas con alto CaO	Lejos	Cerca
Q ₃	35	29	Arcilla y grava con bajo CaO	Arena y grava con alto CaO	Lejos	Cerca

Se interpreto que la unidad Q₃, presenta un mayor espesor sedimentario hacia “Barquisimeto”, lo que parece indicar que la misma unidad tuvo una gran extensión en el área. Sin embargo en “Cabudare” la subsidencia (generada por la Cuenca de Tracción de Cabudare) no fue muy importante hace 0,95 Ma, es decir la Cuenca pudo estar en un periodo de relativa “calma” tectónica.

En “Cabudare” las unidades químicas-radiométricas Cabudare 2 y 3 interpretadas como pertenecientes a la Formación Guamacire (BUSHMAN 1965) presentan 163 m de espesor y están formadas principalmente por arcilla, acompañada de grava y arena; la misma no se encontró en Barquisimeto. Durante la depositación de la Formación Guamacire (Plioceno) la Cuenca de Tracción de Cabudare estuvo activa, generando por subsidencia el espacio necesario para la depositación de la unidad. Además en el intervalo de 220 a 235 m (base de la Formación) se observaron sedimentos arcillosos que posiblemente pertenezcan a una sedimentación de tipo lacustre que se podría corresponder con el inicio de la apertura de la Cuenca, durante el Plioceno (AUDERMARD & GIRALDO 1985).

7.4. PROCEDENCIA DE LOS SEDIMENTOS

En la zona estudiada se observó que el medio de transporte de los sedimentos es en primera instancia de tipo fluvial, y en segunda instancia debido a la acción gravitacional.

Como se menciona en la sección 7.1 existen diferencias significativas en la composición de los pozos de “Barquisimeto” y “Cabudare”.

Tomando en consideración las figuras 43 y 48 se muestra que hacia las unidades más superficiales de “Barquisimeto” y “Cabudare” (Bar-4 y Cab-4 respectivamente), presentan una relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ alta, lo que indica la cercanía de la fuente de sedimentos. Además las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, en ambas unidades es alta lo que indica que los sedimentos son principalmente de grano grueso.

En “Barquisimeto” se tiene un espesor sedimentario (Cuaternario) de aproximadamente 92 m. Se observó un alto contenido de SiO_2 respecto al pozo de Cabudare, esto es causado por la presencia de sedimentos arenosos- arcillosos con clastos de cuarzo, esquisto, filita, lutita y arenisca. Adicionalmente se tienen valores altos de V en “Barquisimeto” y los mismos son asociados a materia orgánica que fue arrastrada por el río Turbio y las quebradas El Mamón, La Ruezga y El Tigre, las cuales son las que intervienen principalmente en el transporte de sedimentos.

Por lo expuesto anteriormente y debido a las relaciones químicas antes mencionadas, se propone que los sedimentos de “Barquisimeto” tienen una fuente principalmente de rocas sedimentarias, cercanas, para la unidad más joven (Q_1) y los mismos provienen de la Formación Barquisimeto (filita y lutita). De igual forma, se interpreta que las formaciones Morán y Matatere (arenisca y lutita), sirvieron como fuente sedimentaria (más lejana) para las unidades más antiguas Q_2 y Q_3 . Es importante señalar que este cambio en la fuente sedimentaria posiblemente refleja el cambio en las condiciones de transporte de sedimentos entre el ciclo de depositación de sedimentos Q_1 , respecto a las condiciones de depositación de los sedimentos Q_2 y Q_3 , es decir un posible cambio de un ambiente fluvial presente

durante la depositación de los sedimentos Q_2 y Q_3 , a un ambiente de tipo cono aluvial hacia la depositación de Q_1 .

Tomando en consideración los informes de las perforaciones realizadas por GISCA (2006), y las interpretaciones realizadas por SCHMITZ *et al.* (2007), se considera que el basamento rocoso del pozo 3, se corresponde con la Formación Bobare compuesta de arenisca y lutita.

Por otra parte en “Cabudare” se tiene un espesor sedimentario de 284 m. Químicamente, el pozo se caracteriza por valores bajos de SiO_2 y altos de CaO , Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , así como de isotopos radioactivos, tales como el ^{214}Bi , ^{40}K y el ^{208}Tl . Esto nos hace inferir que la litología de este pozo está compuesta principalmente por sedimentos ligeramente carbonáticos y arcillosos en detrimento de los sedimentos arenosos. En este pozo se observó durante la etapa de preparación de muestras clastos de cuarzo, calcita ferruginosa, esquisto cuarzo-sericítico, esquisto grafitoso y mármol. Estando el CaO asociado a la calcita y al mármol, y el Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O y los isotopos radioactivos tanto al esquisto grafitoso y sericítico, como a los minerales de arcilla presentes en el pozo.

Mediante el uso de la relación Fe_2O_3/K_2O se infiere que los sedimentos de la unidad Cabudare 4 (interpretados como sedimentos cuaternarios Q_1 , Q_2 y Q_3) provienen principalmente de una fuente sedimentaria cercana, como lo es el Esquisto de Mamey, formado por esquisto cuarzo-sericítico, con vetas de calcita ferruginosa, interpretándose un ambiente de depositación de tipo cono aluvial.

Sin embargo para los sedimentos de las unidades Cabudare 2 y 3 (interpretados como Formación Guamacire), se propone una fuente sedimentaria más lejana, principalmente compuesta de mármol y esquisto grafitoso proveniente del Esquisto de Aroa. El ambiente sedimentario en que se deposita esta unidad se infiere es de tipo fluvial, con intervalo lacustre. De allí que el contacto entre las unidades Cabudare 3 y 4 podría corresponder al límite Cuaternario-Plioceno, observado a los 112 m de profundidad y reflejado por un cambio abrupto en la mayoría de las variables químicas y radiométricas estudiadas (figuras

46, 47 y 48). Los drenajes que intervienen en la depositación de estos sedimentos son las quebradas: Tature y La Mata.

8. CONCLUSIONES

- Mediante la observación de los diagramas de dispersión y el coeficiente de correlación lineal " R^2 " obtenido, se estableció que los componentes Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 y V están asociados principalmente a minerales de arcilla, mientras que el SiO_2 está ligado principalmente al cuarzo. Los primeros poseen coeficientes de correlación negativos con respecto al SiO_2 , estableciéndose así dos grandes grupos de minerales, el grupo de la arcilla y el cuarzo, respectivamente. Igualmente, el Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 y V tienen entre sí coeficientes " R^2 " positivos.
- Las variables químicas, arrojaron resultados más coherentes al ser tratadas con métodos estadísticos multivariantes (análisis de agrupaciones y funciones discriminantes) que las variables radiométricas. Es decir, las funciones discriminantes clasifican con mayor porcentaje de aciertos las unidades generadas por los dendrogramas químicos. De igual forma, se observó que a medida que se usaron más variables la cantidad de casos correctamente clasificados por los análisis de funciones discriminantes aumentan. Las unidades elaboradas mediante el uso de las herramientas estadísticas generaron límites de unidades consistentes con los obtenidos visualmente mediante la observación de los perfiles de distribución químico-radiométricos y de color Munsell.
- Empleando tanto los perfiles de distribución, como las unidades generadas por métodos estadísticos, se definieron cuatro unidades químico-radiométricas en "Barquisimeto" y cuatro unidades químico-radiométricas en "Cabudare", con porcentajes de casos bien clasificados de 89 y 90 % respectivamente.
- Se observó que existen diferencias estadísticas significativas entre los pozos de "Barquisimeto" y "Cabudare". Por consiguiente se infiere que sus sedimentos tuvieron fuentes sedimentarias distintas, siendo en "Barquisimeto" principalmente silíceo y en "Cabudare" más carbonático y arcilloso.

- En el pozo de “Barquisimeto” se observó una posible correspondencia entre las unidades y sub-unidades químicas-radiométricas generadas, con los sedimentos Q₁, Q₂, y Q₃ propuestos por GIRALDO (1985), lo cual nos da indicios de la existencia en la zona de 3 ciclos sedimentarios cuaternarios distintivos, probablemente con edades mínimas de 0,01, 0,4 Ma y 0,95 Ma, respectivamente. El basamento rocoso de “Barquisimeto”, se interpretó como perteneciente a la Formación Bobare, siendo importante resaltar que debido a la complejidad estructural de la zona, probablemente bajo la ciudad de Barquisimeto, el basamento rocoso este constituido por más de una Formación.

- Se encontró que en “Cabudare” las unidades y sub-unidades químicas-radiométricas definidas se pueden interpretar como pertenecientes a cuatro ciclos sedimentarios. Asociados tanto a la depositación de la Formación Guamacire (Plioceno), como a la de los sedimentos cuaternarios de GIRALDO (1985) Q₁ (0,01 Ma), Q₂ (0,4 Ma) y Q₃ (0,95 Ma). Adicionalmente hacia la base de la Formación Guamacire en el intervalo comprendido entre los 220 y 235 m de profundidad, se encontraron sedimentos arcillosos de baja energía que sugiere la existencia de un ambiente lacustre ligado a los episodios iniciales de la apertura de la Cuenca de Tracción de Cabudare, durante el Plioceno. Se infiere que basamento rocoso de Cabudare lo conforma el Esquisto de Mamey.

- Los sedimentos de “Barquisimeto” se depositaron posiblemente en un ambiente fluvial para las unidades cuaternarias Q₂ y Q₃, mientras que la unidad Q₁ se depositó posiblemente en un ambiente de tipo cono aluvial. La fuente de sedimentos para éste pozo se postula que proviene principalmente de las formaciones Barquisimeto, Moran y Matatere.

- Los sedimentos de “Cabudare” se depositaron posiblemente bajo la influencia de ambientes sedimentarios de tipo cono aluvial para los sedimentos interpretados como Q₁, Q₂ y Q₃, mientras que los sedimentos interpretados como pertenecientes a la Formación Guamacire, se infiere se depositaron bajo la influencia de un ambiente fluvial con intervalos lacustres (hacia la base del pozo). El principal aporte de sedimentos de “Cabudare” es proveniente del Esquisto de Mamey y del Esquisto de Aroa.

- Se interpretan varios períodos de actividad tectónica (subsistencia) de la Cuenca de Tracción de Cabudare. Durante la depositación de la Formación Guamacire (Plioceno) se inicia la apertura de la Cuenca y hay gran subsistencia, seguidamente se infiere un período de menor actividad tectónica hacia 0,95 Ma (depositación de Q₃), continuando con una reactivación de la actividad tectónica de la Cuenca hacia 0,4 Ma (depositación de Q₂).

9. RECOMENDACIONES

- Realizar análisis de elementos traza a las muestras de las perforaciones geofísicas (P-3 y P-6), debido a que los elementos traza reflejan las condiciones físico – químicas en que estos sedimentos se formaron.
- Realizar un análisis de difracción de rayos X, a las muestras de las perforaciones geofísicas (P-3 y P-6) y a la perforación geotécnica (P-1), con la finalidad determinar la composición mineralógica de las mismas.
- Efectuar dataciones por radiocarbono (^{14}C), a las unidades definidas tanto en “Barquisimeto” como en “Cabudare”, con la finalidad de afirmar su correlación con las unidades sedimentarias del Cuaternario definidas por GIRALDO (1985).

9. BIBLIOGRAFÍA

Abreviaturas:

M.M.H.: Ministerio de Minas e Hidrocarburos

ADAMS J. & C. WEAVER. 1958. Thorium to Uranium ratios as indicator of sedimentary processes: Example of Concept of Geochemical Facies. *AAPG. Bull.* 42 (2): 387-430.

AGUILAR I. & E. CARABALLO 2007. Caracterización geoquímica de los abanicos aluviales del valle de Caracas, a partir de pozos en Los Chorros, Sebucán y Parque del Este. *Geos* (Caracas) 39: 166 + 170 p. en CD.

ALBERDING H. 1957. Application of principles of wrench-fault tectonics of Moody and Hill to northern South America. *Bull. Geol. Soc America.* 68:785-790.

ARREAZA C. 2003. Caracterización química de las formaciones Naricual y Querecual, en sus localidades tipo, Estado Anzoátegui. *Geos* (Caracas) 36: 166 + 412 p. en CD.

AUDEMARD F. & C. GIRALDO 1997. La cuenca de tracción de Cabudare, Venezuela Centro-Occidental. *Memorias VIII Congreso Geológico Venezolano*, Sociedad Venezolana de Geología, Tomo 1:351-357.

AUDEMARD F., J. COX & R. MACHETTE 2000. *Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela*. U.S. Geological Survey (USGS) y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Escala 1: 2.000.000.

BECHTOLD M. 2004. *Mapa geológico digital de Barquisimeto y sus alrededores con énfasis Cuaternario*. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Escala 1: 200.000.

BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ 1967. Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare. *Boletín de Geología* (Caracas). M.M.H., 8 (16): 289-309.

BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ 1968. Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. *Boletín de Geología* (Caracas) M.M.H., 9 (18): 515-563.

BHATIA M. 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology* 91 (6): 611-627.

BOGGS S. 2001. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Third Edition. New Jersey Prentice Hall, 726 p.

BUSHMAN J. 1959. Geology of the Barquisimeto area. A summary report. *Boletín de Geología* (Caracas), 2(4): 65-84.

- BUSHMAN J. 1965. Geología del área de Barquisimeto, Venezuela. *Boletín de Geología* (Caracas) M.M.H., 6 (11): 3-113.
- CAMPOSANO L. & N. MARTINEZ 2000. Caracterización química y radiométrica de secciones estratigráficas de las formaciones Barco y Mirador, San Pedro del Río, estado Táchira. *Geos* (Caracas) 36:70 + 248 p. en CD.
- CASAS-SAINZ A. & H. DIEDERIX 1992. El valle de Yaracuy (límite S de la Placa Caribe, Venezuela): ejemplo de una cuenca cuaternaria asociada a una curvatura de falla. III *Memorias Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Tomo 4: 269-264 p.
- CASAS-SAINZ A. 1992. A neotectonic model of the northern sector of the Bocono Fault (southern boundary of the Caribe Plate, Venezuela). *13° Caribbean Geological Conference*. Cuba. Tomo 1: 1-19.
- CHACIN C. 2003. Caracterización química y radiométrica de muestras de canal correspondientes a cuatro pozos del campo petrolífero La Concepción, Estado Zulia. *Geos* (Caracas) 36: 78 + 254 p. en CD.
- CORONEL G. & O. RENZ 1960. Los deslizamientos submarinos al Noreste de Barquisimeto, estado Lara. *Memorias III Congreso Geológico Venezolano* tomo 2:743-760.
- CORRALES I, J. ROSELL, L. SÁNCHEZ, J. VERA & L. VILAS 1977. *Estratigrafía*. Ediciones Rueda, Madrid, 491 p.
- CROW E. & D. FRANCES 1960. *Statistics manual*. Dover Publications, New York, 288 p.
- DAVIS J. (1973). *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley, New York, U.S.A, 550 p.
- DE MARCO C. 2004. Caracterización geofísica de la terraza aluvial de Barquisimeto, estado Lara. *Geos* (Caracas) 38: 103 + 200 p. en CD.
- FAURE G. 1998. *Principles and applications of geochemistry. A comprehensive textbook for geology students*. Second Edition. Prentice Hall, New Jersey. 600 p.
- FOLK, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*, University of Texas, Austin: 617 p.
- GARCÍA J., J. STEPHAN, F. RONDÓN, G. CANELÓN, I. FIERRO, & R. GIEGENGACK 1977. Guía de la excursión No. 6: Cordillera de Los Andes y Surco de Barquisimeto. *Memorias del V Congreso Geológico Venezolano*. Sociedad Venezolana de Geología, Tomo 5: 191-231 p.
- GEOTÉCNICA E INGENIERÍA SÍSMICA 2006. *Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, Estado Lara, Venezuela*. GISCA. Informe inédito. 45 p.

- GIRALDO C. 1985. Neotectónica y sismotectónica de la región de El Tocuyo-San Felipe (Venezuela centro-occidental). *Memorias del VI Congreso Geológico Venezolano*. Sociedad Venezolana de Geología, Tomo 3:2415-2451 p.
- GONZÁLEZ DE JUANA C., J. ITURRALDE & X. PICARD 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas, Ed. Foninves, 2 tomos. 1021 p.
- GONZÁLEZ L. & G. SÁNCHEZ 2001. Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la Formación La Luna, en el estado Táchira. *Geos* (Caracas) 36: 72 + 230 p. en CD.
- HACKLEY P., F. URBANI, A. KARLSEN & C. GARRITY 2005. *Geologic shaded relief map of Venezuela*. USGS Series Open-File Report Report 2005-1038 (<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1038/>)
- HERRON M. 1988 Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 820-829 p.
- JORGENSEN N. 1986 Chemostratigraphy of Upper Cretaceous chalk in the Danish subbasin. *AAPG Bulletin*. 70 (3): 309-317.
- MAPA POLÍTICO DEL ESTADO LARA. Disponible en <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/lara.html>
- MASON B. & C. MOORE 1958. *Principles of Geochemistry*. New York, John Wiley and Sons, 310 p.
- MORALES C., C. REINOZA, C. SÁNCHEZ, J. ÁVILA, & M. SCHMITZ 2008. Modelado sísmico bidimensional de las cuencas de Barquisimeto y Cabudare en el Edo. Lara-Venezuela, a través del análisis de perfiles de refracción sísmica. *Memorias del XIV Congreso Venezolano de Geofísica*. 8 p en CD
- NILSEN T. 1988. Alluvial fan deposits. *AAPG Mem.* 31:49-86.
- NOBILE B. 2005. Caracterización geofísica de la cuenca “Pull Apart” de Cabudare, Noroccidente de Venezuela. *Geos* (Caracas) 38: 107 + 114 p. en CD.
- NOGUERA M. & YÉPEZ S. 2002. Caracterización química de secciones estratigráficas: formaciones Naricual y Querecual, estados Anzoátegui y Monagas. *Geos* (Caracas) 36: 74 + 281 p. en CD.
- OVALLES F. 2003. El color del suelo: definiciones e interpretación. *Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela*. N° 3. Disponible en <http://www.ceniap.gov.ve/pbd/RevistasTecnicas/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm>

- PESTMAN P, S. GHOSH, L. MELÉNDEZ & M. LORENTE 1998. Marco tectonoestratigráfico y paleogeografía de la Cuenca de Maracaibo y áreas vecinas durante el Paleógeno. *Boletín Sociedad Venezolana de Geología*. 23 (1): 28-45.
- PETTIJOHN F., P. POTTER & R. SIEVER 1972 *Sand & Sandstones*. Springer-Verlag, USA, 553p.
- REINOZA C., C. MORALES, V. ROCABADO, J. SÁNCHEZ, K. GARCÍA & M. SCHMITZ, 2008. Estimación de sedimentos a partir del modelado gravimétrico 3D con fines de Microzonificación Sísmica: Ciudades de Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. *Memorias del XIV Congreso Venezolano de Geofísica*. 8 p. en CD.
- RENZ O. 1959. Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela Occidental. *Boletín de Geología*, M.M.H., 5 (10): 3-48.
- RODRÍGUEZ N., A. RUIZ & E. TUNDIDOR. 2000 Caracterización química por fluorescencia de rayos X y radioisotópica por espectrometría gamma multicanal de dos secciones estratigráficas de la Formación Guárico, El Pao, estado Cojedes. *Geos* (Caracas) 36: 70 + 263 p. en CD.
- ROLLINSON H. 1993. *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman SCIENTIFIC & Technical, New York, 352 p.
- ROSENWASSER S. 2000. Chemostratigraphy – the elemental solution using laser induced breakdown spectrometry. *1st Internacional Conference on Laser Induced Plasma Spectroscopy and Applications*, Italia. 11 p.
- SCHMITZ M., C. MORALES, C. SÁNCHEZ, C. REINOZA & J. ÁVILA 2007. *Mediciones de refracción sísmica profunda en las ciudades de Cabudare y Barquisimeto*. FUNVISIS. Caracas, FUN-038,2007. 37 p. en CD.
- SCHUBERT C. 1980. Morfología neotectónica de una falla de rumbo-deslizante e informe preliminar sobre la Falla de Boconó, Andes merideños. *Acta Científica Venezolana*, 31:98-111.
- SERRANO M. 2003. Caracterización química y radiométrica de una sección del Eoceno en el subsuelo del Lago de Maracaibo, Cuenca de Maracaibo, Estado Zulia. *Geos* (Caracas) 36: 75 + 201 p. en CD.
- SKOOG D. & D. WEST 1984. *Análisis instrumental*. 2da edición, Ed. Interamericana, México, 806 p.
- SOLÓRZANO A. 2005. *Determinación de los pesos de muestra y tiempo óptimos para realizar análisis del espectro de rayos gamma, utilizando el sistema de espectrometría de rayos gamma Amptek MCA8000A "POCKET MCA"*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Geofísica y Minas. Laboratorio de Geoquímica (330). Inédito 40 p.

- SOULAS J., C. ROJAS & C. SCHUBERT 1985. Geotectónica de las fallas de Boconó, Valera, Tuñame y Mene Grande. *Memorias del VI Congreso Geológico Venezolano*, Sociedad Venezolana de Geología, Tomo 10: 6962:6999.
- SPIEGEL M. 1991 *Estadística* (Serie Schaum). Madrid, Mc Graw- Hill, 532 p.
- STEPHAN J. 1977. El contacto Cadena Caribe-Andes Merideños entre Carora y El Tocuyo (Edo. Lara): Observaciones sobre el estilo y la edad de las deformaciones cenozoicas en el Occidente Venezolano. *Memorias V Congreso Geológico Venezolano*, Sociedad Venezolana de Geología. Tomo 2:789-811.
- STEPHAN J. 1982. *Evolution géodynamique du domaine Caraïbe Andes et chaine Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Venezuela)*. Tesis PhD., Univ Pierre y Marie Curie, Paris. 512 p.
- STEPHAN J., O. MACSOTAY & E. ALVAREZ 1987. Grupo Lara: sedimentitas y perinsulares en el Cretácico alóctono de Venezuela occidental. *Boletín de Geología* (Caracas), M.M.H., 16 (28): 3-78.
- URBANI F. 2005. Revisión de las unidades de las rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de La Costa, Venezuela. *Geos*, (Caracas) 33:1-170.
- VON DER OSTEN E. & D. ZOZAYA 1957. Geología de la parte suroeste del Estado Lara, región de Quibor. *Boletín de Geología* (Caracas), M.M.H., 9 (9): 3:52.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. RESULTADOS ANALÍTICOS

A continuación se muestran en forma de tabla los resultados de los análisis de espectrometría gamma multicanal a los pozos 1, 3 y 6. (Tablas A1, A2 y A3 respectivamente. Los resultados del análisis de fluorescencia de rayos X de los pozos 1, 3 y 6, se muestra en las tablas A4, A5, y A6 respectivamente. Finalmente los resultados del análisis de color Munsell de los pozos 1, 3 y 6, se muestra en las tablas A7, A8 y A9, respectivamente.

Tabla A1. Variables radiométricas en el pozo 1

MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
0,2	0,960	0,912	0,809	1,450	0,606	0,484	0,406	0,275	0,247	0,391	0,163
1,55	1,080	0,938	0,911	1,440	0,614	0,478	0,441	0,300	0,264	0,405	0,153
2,55	1,030	0,917	0,906	1,430	0,634	0,493	0,450	0,300	0,279	0,382	0,164
5,55	1,100	0,923	0,884	1,440	0,635	0,490	0,441	0,275	0,275	0,415	0,193
10,55	1,040	0,958	0,951	1,470	0,656	0,509	0,427	0,293	0,263	0,399	0,173
12,55	1,070	0,884	0,937	1,460	0,641	0,489	0,459	0,332	0,287	0,411	0,157
13,55	1,160	1,027	1,059	1,570	0,713	0,526	0,447	0,373	0,289	0,452	0,193
14,55	1,170	1,024	1,002	1,560	0,764	0,557	0,457	0,379	0,315	0,429	0,191
16,55	1,020	0,912	0,967	1,390	0,659	0,522	0,404	0,276	0,296	0,402	0,155
17,2	0,960	0,848	0,919	1,410	0,633	0,451	0,401	0,285	0,263	0,398	0,182
23,55	1,030	0,856	0,916	1,360	0,666	0,461	0,390	0,272	0,286	0,382	0,167
25,55	1,160	1,041	1,074	1,500	0,758	0,545	0,445	0,321	0,319	0,483	0,197
26	1,350	1,093	0,983	1,720	0,797	0,565	0,530	0,379	0,273	0,475	0,197
27,55	1,370	1,164	1,035	1,690	0,768	0,597	0,474	0,415	0,270	0,473	0,193
28,55	1,200	1,085	0,965	1,520	0,673	0,570	0,438	0,368	0,293	0,463	0,181
29,55	1,230	1,045	1,012	1,620	0,729	0,557	0,501	0,387	0,300	0,415	0,183
35,55	1,300	1,171	1,037	1,650	0,765	0,595	0,498	0,426	0,315	0,480	0,197
38,55	1,310	1,096	1,090	1,660	0,729	0,595	0,499	0,380	0,305	0,417	0,193
44,55	1,180	0,989	1,009	1,550	0,683	0,537	0,453	0,348	0,283	0,451	0,189
47,55	1,300	1,133	1,067	1,670	0,771	0,595	0,505	0,419	0,351	0,465	0,199
53,55	1,250	1,043	1,093	1,610	0,732	0,551	0,451	0,385	0,281	0,443	0,191
56,55	1,060	0,949	0,943	1,510	0,648	0,547	0,453	0,316	0,277	0,433	0,147
59,55	1,290	1,105	1,117	1,610	0,767	0,599	0,513	0,366	0,317	0,494	0,202
62,05	1,050	0,911	0,993	1,410	0,655	0,520	0,423	0,297	0,276	0,415	0,162
68,55	1,190	1,005	1,082	1,540	0,757	0,577	0,459	0,351	0,345	0,437	0,192
74,55	1,180	1,017	1,061	1,450	0,725	0,543	0,415	0,364	0,302	0,429	0,181

77,55	1,220	1,070	1,098	1,600	0,795	0,589	0,485	0,363	0,309	0,471	0,204
<i>Tabla A1 (Continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
80,55	1,090	0,947	0,830	1,380	0,611	0,515	0,458	0,315	0,238	0,403	0,161
83,55	1,140	1,003	0,805	1,480	0,671	0,542	0,462	0,315	0,238	0,426	0,183
85,55	1,130	0,990	0,780	1,440	0,620	0,520	0,470	0,300	0,250	0,410	0,170
87	1,110	0,971	0,763	1,400	0,571	0,505	0,477	0,291	0,259	0,398	0,158
89	1,070	0,961	0,835	1,400	0,596	0,487	0,431	0,263	0,219	0,397	0,166

Tabla A2. Variables radiométricas en el pozo 3.

MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
10	1,050	0,900	0,999	1,470	0,655	0,516	0,433	0,309	0,315	0,413	0,156
11	1,070	0,920	0,965	1,400	0,683	0,497	0,417	0,291	0,301	0,436	0,146
12	1,070	0,877	0,970	1,430	0,662	0,501	0,410	0,298	0,305	0,431	0,152
13	1,080	0,896	0,994	1,380	0,682	0,530	0,429	0,283	0,337	0,404	0,150
14	1,040	0,853	0,957	1,380	0,730	0,527	0,429	0,283	0,374	0,402	0,181
15	1,070	0,865	1,011	1,360	0,742	0,525	0,459	0,308	0,328	0,423	0,175
16	1,050	0,893	0,986	1,390	0,707	0,509	0,406	0,305	0,342	0,378	0,187
17	1,030	0,960	0,971	1,440	0,659	0,499	0,441	0,277	0,319	0,430	0,152
18	1,100	0,869	0,997	1,450	0,655	0,553	0,426	0,309	0,287	0,394	0,166
19	1,100	0,927	1,011	1,410	0,672	0,528	0,434	0,279	0,323	0,387	0,157
20	1,060	0,914	1,015	1,460	0,685	0,559	0,411	0,287	0,361	0,437	0,181
21	1,150	0,970	1,056	1,430	0,819	0,541	0,441	0,313	0,360	0,455	0,200
22	1,110	0,880	0,992	1,280	0,767	0,521	0,450	0,256	0,339	0,389	0,161
23	1,000	0,862	0,989	1,300	0,768	0,522	0,455	0,297	0,333	0,425	0,185
24	1,030	0,882	1,019	1,340	0,793	0,509	0,439	0,285	0,311	0,391	0,174
26	1,050	0,849	1,011	1,300	0,748	0,515	0,448	0,261	0,325	0,401	0,183
27	1,060	0,865	1,083	1,360	0,828	0,521	0,423	0,307	0,367	0,406	0,180
28	1,110	0,958	1,051	1,330	0,854	0,543	0,454	0,303	0,385	0,440	0,193
30	1,190	0,962	1,103	1,430	0,879	0,565	0,459	0,315	0,395	0,465	0,193
32	1,090	0,945	0,998	1,460	0,681	0,551	0,461	0,339	0,351	0,411	0,169
33	1,100	0,955	0,945	1,460	0,699	0,538	0,420	0,327	0,315	0,449	0,186
34	1,250	1,039	1,125	1,590	0,756	0,587	0,445	0,356	0,332	0,430	0,189
37	1,160	0,971	1,000	1,510	0,735	0,541	0,429	0,327	0,343	0,430	0,163
41	1,230	0,973	1,083	1,460	0,729	0,588	0,467	0,344	0,348	0,457	0,182
42	1,220	1,007	1,060	1,480	0,767	0,577	0,465	0,371	0,365	0,453	0,169
43	1,100	0,929	1,058	1,390	0,727	0,554	0,443	0,302	0,342	0,427	0,182
44	1,140	1,000	1,078	1,550	0,825	0,532	0,488	0,337	0,356	0,453	0,184
45	1,130	0,928	1,030	1,420	0,725	0,561	0,425	0,318	0,350	0,418	0,168

46	1,070	0,919	1,012	1,400	0,721	0,528	0,437	0,291	0,328	0,435	0,177
<i>Tabla A2 (Continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
47	1,050	0,871	0,980	1,340	0,781	0,523	0,415	0,291	0,328	0,427	0,182
48	1,170	1,068	0,831	1,450	0,631	0,531	0,449	0,343	0,286	0,427	0,186
50	1,150	1,044	0,918	1,470	0,655	0,577	0,427	0,375	0,292	0,420	0,171
51	1,230	1,072	0,925	1,600	0,728	0,552	0,472	0,372	0,313	0,461	0,191
53	1,100	0,978	0,905	1,490	0,636	0,483	0,453	0,314	0,294	0,399	0,185
54	1,210	0,961	0,982	1,500	0,653	0,550	0,450	0,335	0,315	0,401	0,159
55	1,150	0,917	0,958	1,540	0,663	0,522	0,427	0,347	0,309	0,441	0,188
56	1,140	0,995	1,045	1,570	0,694	0,538	0,476	0,333	0,298	0,399	0,167
57	1,050	0,938	0,951	1,500	0,684	0,523	0,446	0,328	0,323	0,444	0,163
61	1,140	0,930	0,959	1,430	0,662	0,499	0,408	0,315	0,285	0,428	0,166
62	1,010	0,917	0,950	1,440	0,639	0,493	0,417	0,315	0,299	0,367	0,174
67	1,080	0,976	0,997	1,520	0,664	0,554	0,464	0,315	0,293	0,427	0,171
68	1,100	0,993	0,915	1,460	0,605	0,504	0,452	0,292	0,255	0,414	0,153
70	1,160	1,086	0,903	1,530	0,686	0,535	0,509	0,344	0,234	0,423	0,000
72	1,240	1,175	0,975	1,550	0,702	0,610	0,506	0,371	0,299	0,437	0,195
73	1,230	1,036	0,893	1,510	0,629	0,593	0,463	0,338	0,243	0,437	0,173
74	1,150	1,042	0,889	1,470	0,664	0,517	0,465	0,320	0,267	0,417	0,181
75	1,100	0,994	0,891	1,500	0,635	0,505	0,428	0,343	0,265	0,413	0,180
76	1,170	0,979	0,937	1,490	0,595	0,506	0,439	0,349	0,258	0,445	0,185
78	1,280	1,052	1,027	1,660	0,695	0,580	0,483	0,355	0,259	0,425	0,181
79	1,150	1,019	0,967	1,540	0,665	0,585	0,442	0,341	0,273	0,437	0,163
80	1,160	0,971	1,030	1,370	0,961	0,565	0,489	0,351	0,315	0,423	0,173
82	1,150	0,939	1,091	1,380	0,853	0,520	0,456	0,332	0,299	0,210	0,167
83	1,150	0,969	1,051	1,420	0,795	0,513	0,458	0,356	0,277	0,441	0,181
85	1,100	0,965	1,027	1,410	0,787	0,561	0,433	0,331	0,317	0,411	0,170
86	1,070	0,930	0,928	1,440	0,681	0,524	0,448	0,320	0,252	0,397	0,193
87	1,120	0,958	0,900	1,410	0,633	0,516	0,439	0,327	0,264	0,394	0,162
88	1,120	0,978	0,913	1,480	0,634	0,513	0,453	0,328	0,260	0,405	0,170

89	1,090	0,964	0,905	1,480	0,635	0,533	0,435	0,323	0,272	0,409	0,164
<i>Tabla A2 (Continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴Bi	²¹²Bi	F2	²¹⁴Bi	F3	⁴⁰K	F4	²¹⁴B	F5	²⁰⁸Tl
90	1,140	0,984	0,939	1,500	0,646	0,549	0,478	0,353	0,267	0,432	0,175
91	1,170	1,002	1,065	1,520	0,669	0,563	0,461	0,341	0,303	0,413	0,174
92	1,150	0,999	1,003	1,490	0,691	0,507	0,461	0,347	0,295	0,456	0,173
93	1,080	0,961	0,953	1,470	0,671	0,547	0,465	0,311	0,283	0,395	0,160
94	1,150	1,009	1,022	1,470	0,672	0,527	0,429	0,337	0,277	0,425	0,187
95	1,120	0,972	1,016	1,440	0,669	0,514	0,449	0,339	0,255	0,436	0,175
96	1,060	0,957	1,015	1,470	0,706	0,559	0,475	0,357	0,287	0,423	0,174
97	1,030	0,889	0,937	1,400	0,652	0,523	0,412	0,319	0,285	0,387	0,159
98	1,030	0,900	1,026	1,440	0,701	0,523	0,420	0,313	0,309	0,381	0,161
99	1,040	0,891	0,999	1,370	0,739	0,548	0,451	0,307	0,288	0,422	0,183
100	1,150	0,997	0,862	1,490	0,661	0,555	0,457	0,337	0,251	0,447	0,178
101	1,120	1,002	0,887	1,500	0,599	0,531	0,439	0,317	0,261	0,429	0,176
102	1,150	1,004	0,902	1,540	0,631	0,534	0,428	0,331	0,233	0,418	0,185
103	1,230	1,087	0,949	1,470	0,646	0,559	0,476	0,341	0,294	0,437	0,190
104	1,260	1,059	1,021	1,540	0,720	0,569	0,499	0,391	0,284	0,467	0,191

Tabla A3. Variables radiométricas en el pozo 6

MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
1	1,080	0,917	1,009	1,470	0,664	0,511	0,431	0,295	0,329	0,413	0,183
2	1,080	0,883	0,952	1,410	0,633	0,533	0,423	0,289	0,387	0,422	0,173
3	1,040	0,903	0,957	1,470	0,705	0,516	0,430	0,285	0,391	0,399	0,184
4	1,120	0,902	1,049	1,440	0,691	0,533	0,431	0,283	0,387	0,410	0,178
5	1,030	0,899	0,985	1,400	0,679	0,525	0,439	0,288	0,393	0,411	0,176
6	1,040	0,868	0,998	1,410	0,715	0,535	0,391	0,294	0,379	0,433	0,199
8	1,130	0,986	1,011	1,490	0,743	0,556	0,455	0,288	0,397	0,437	0,195
9	1,100	1,015	1,028	1,390	0,778	0,535	0,442	0,278	0,384	0,424	0,174
10	1,120	0,939	0,930	1,550	0,648	0,535	0,424	0,268	0,343	0,421	0,183
11	1,150	0,997	1,054	1,530	0,711	0,561	0,463	0,319	0,346	0,446	0,204
12	1,090	0,936	0,911	1,460	0,628	0,519	0,425	0,299	0,345	0,428	0,175
13	1,050	0,892	0,988	1,420	0,664	0,541	0,425	0,285	0,347	0,431	0,174
14	1,020	0,927	0,982	1,490	0,665	0,509	0,449	0,289	0,326	0,417	0,206
15	1,050	0,929	0,914	1,460	0,661	0,512	0,424	0,261	0,355	0,370	0,173
16	0,960	0,891	0,957	1,460	0,681	0,516	0,425	0,262	0,325	0,424	0,184
18	1,020	0,865	0,937	1,350	0,654	0,513	0,412	0,273	0,349	0,393	0,171
19	1,040	0,890	0,933	1,430	0,624	0,499	0,394	0,285	0,333	0,416	0,171
20	1,070	0,918	0,976	1,440	0,715	0,523	0,437	0,299	0,374	0,421	0,191
21	1,020	0,886	0,938	1,430	0,690	0,571	0,419	0,286	0,377	0,413	0,190
23	0,990	0,872	0,921	1,390	0,646	0,478	0,439	0,274	0,352	0,373	0,187
24	1,100	0,952	0,996	1,470	0,708	0,495	0,449	0,284	0,361	0,404	0,198
25	1,060	0,925	0,980	1,410	0,650	0,500	0,447	0,283	0,369	0,419	0,176
26	1,040	0,910	0,968	1,430	0,657	0,527	0,396	0,289	0,333	0,439	0,179
27	1,010	0,849	0,965	1,420	0,631	0,517	0,425	0,277	0,369	0,411	0,170
28	1,040	0,854	0,931	1,380	0,666	0,521	0,425	0,293	0,340	0,400	0,181
29	1,040	0,907	0,941	1,430	0,645	0,529	0,426	0,291	0,328	0,428	0,175
30	1,010	0,907	0,921	1,470	0,653	0,485	0,437	0,275	0,327	0,407	0,188
32	1,030	0,887	0,931	1,380	0,635	0,522	0,428	0,294	0,343	0,431	0,157
33	1,030	0,875	0,936	1,450	0,607	0,519	0,396	0,293	0,328	0,379	0,165
34	0,990	0,914	0,906	1,410	0,637	0,493	0,440	0,251	0,326	0,368	0,166
35	1,020	0,899	0,901	1,380	0,624	0,523	0,409	0,264	0,361	0,413	0,159
36	0,990	0,851	0,917	1,360	0,611	0,536	0,449	0,273	0,339	0,381	0,175
37	0,990	0,851	0,917	1,360	0,611	0,536	0,449	0,273	0,339	0,381	0,175
38	0,970	0,898	0,893	1,380	0,650	0,507	0,421	0,290	0,352	0,388	0,179
39	1,050	0,906	0,970	1,470	0,660	0,538	0,399	0,276	0,337	0,438	0,184
40	0,990	0,907	0,981	1,470	0,694	0,571	0,446	0,307	0,372	0,415	0,183

41	1,140	0,898	0,949	1,450	0,697	0,526	0,461	0,297	0,362	0,412	0,191
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
42	1,050	0,900	0,929	1,400	0,657	0,532	0,408	0,300	0,321	0,385	0,168
43	1,050	0,963	0,854	1,440	0,605	0,497	0,420	0,315	0,346	0,415	0,197
44	1,100	0,952	0,922	1,480	0,618	0,550	0,441	0,314	0,331	0,405	0,178
45	1,090	0,931	0,914	1,510	0,664	0,495	0,427	0,314	0,305	0,395	0,159
46	1,030	0,896	0,876	1,440	0,605	0,439	0,422	0,296	0,294	0,384	0,150
47	1,100	0,963	0,939	1,480	0,644	0,562	0,429	0,322	0,307	0,413	0,178
48	1,010	0,837	0,928	1,430	0,616	0,513	0,431	0,269	0,295	0,410	0,177
49	0,970	0,845	0,914	1,390	0,589	0,495	0,395	0,291	0,314	0,407	0,157
50	1,050	0,894	0,896	1,430	0,599	0,499	0,436	0,280	0,362	0,397	0,182
51	1,030	0,885	0,900	1,420	0,643	0,475	0,405	0,267	0,313	0,371	0,183
52	1,120	0,933	0,939	1,440	0,651	0,540	0,467	0,311	0,337	0,438	0,185
53	1,010	0,891	0,897	1,370	0,610	0,491	0,409	0,283	0,336	0,407	0,173
54	1,030	0,879	0,911	1,440	0,671	0,521	0,449	0,285	0,331	0,390	0,164
55	1,060	0,894	0,923	1,460	0,603	0,520	0,445	0,296	0,348	0,404	0,182
56	1,030	0,893	0,990	1,400	0,667	0,492	0,428	0,293	0,335	0,401	0,174
57	1,110	1,006	1,005	1,520	0,751	0,573	0,435	0,324	0,375	0,390	0,200
58	1,140	0,961	1,029	1,480	0,728	0,544	0,454	0,300	0,350	0,433	0,167
59	0,960	0,913	0,983	1,420	0,675	0,525	0,421	0,271	0,342	0,393	0,175
60	1,030	0,953	0,909	1,420	0,601	0,496	0,430	0,293	0,314	0,392	0,158
61	1,040	0,940	0,910	1,440	0,630	0,510	0,420	0,290	0,320	0,390	0,170
62	1,060	0,922	0,920	1,460	0,657	0,522	0,409	0,282	0,335	0,397	0,173
63	1,110	0,909	0,988	1,490	0,660	0,533	0,459	0,315	0,341	0,440	0,185
64	1,040	0,947	0,946	1,460	0,659	0,515	0,418	0,321	0,349	0,411	0,185
65	1,040	0,871	0,914	1,390	0,597	0,487	0,393	0,266	0,317	0,411	0,186
66	1,000	0,907	0,924	1,390	0,643	0,490	0,443	0,281	0,295	0,396	0,178
67	1,030	0,853	0,863	1,420	0,624	0,522	0,423	0,293	0,293	0,423	0,169
68	1,090	0,956	0,928	1,470	0,604	0,517	0,443	0,312	0,314	0,383	0,196
69	1,060	0,921	0,876	1,380	0,605	0,537	0,421	0,287	0,306	0,408	0,168
70	1,060	0,927	0,941	1,480	0,633	0,515	0,434	0,289	0,318	0,380	0,183
71	1,070	0,900	0,888	1,420	0,606	0,527	0,423	0,279	0,301	0,432	0,171
72	1,080	0,917	0,908	1,460	0,612	0,539	0,420	0,303	0,322	0,415	0,174
73	1,070	0,909	0,951	1,480	0,605	0,539	0,437	0,307	0,325	0,394	0,197
74	1,030	0,919	0,987	1,450	0,622	0,513	0,403	0,281	0,312	0,419	0,177
75	1,100	1,054	0,675	1,420	0,609	0,474	0,428	0,328	0,229	0,403	0,153
77	1,230	1,116	0,697	1,420	0,617	0,559	0,458	0,331	0,262	0,403	0,175

78	1,260	1,061	0,831	1,510	0,630	0,559	0,443	0,344	0,285	0,403	0,166
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
79	1,230	1,111	0,847	1,510	0,674	0,561	0,485	0,354	0,289	0,434	0,194
80	1,120	0,985	0,839	1,490	0,631	0,505	0,411	0,325	0,307	0,399	0,145
81	1,150	1,020	0,915	1,520	0,723	0,540	0,437	0,347	0,317	0,449	0,165
82	1,090	0,983	0,885	1,490	0,632	0,518	0,449	0,315	0,272	0,413	0,165
83	1,100	0,963	0,918	1,440	0,625	0,504	0,431	0,325	0,345	0,391	0,156
84	1,030	0,898	0,881	1,410	0,586	0,515	0,420	0,293	0,303	0,379	0,162
85	1,010	0,895	0,877	1,430	0,638	0,523	0,450	0,311	0,326	0,368	0,162
86	1,010	0,898	0,929	1,470	0,629	0,505	0,412	0,294	0,304	0,419	0,175
87	1,060	0,952	0,896	1,440	0,607	0,515	0,400	0,321	0,324	0,419	0,159
88	1,030	0,884	0,944	1,450	0,641	0,495	0,431	0,276	0,345	0,389	0,165
89	1,040	0,939	1,003	1,440	0,601	0,513	0,418	0,284	0,339	0,412	0,176
90	1,020	0,869	0,949	1,400	0,676	0,519	0,384	0,283	0,354	0,417	0,171
91	1,080	0,933	1,021	1,450	0,716	0,534	0,451	0,317	0,350	0,418	0,185
92	1,030	0,885	1,015	1,430	0,704	0,520	0,401	0,308	0,335	0,405	0,197
93	1,090	0,942	1,061	1,490	0,741	0,554	0,433	0,309	0,383	0,413	0,195
94	1,040	0,907	1,017	1,420	0,718	0,505	0,427	0,299	0,345	0,434	0,169
95	1,110	0,868	1,013	1,340	0,761	0,508	0,457	0,303	0,365	0,415	0,185
96	1,040	0,853	1,007	1,360	0,757	0,500	0,403	0,261	0,373	0,394	0,177
97	1,070	0,967	1,052	1,440	0,805	0,528	0,435	0,327	0,417	0,426	0,180
98	1,050	0,884	1,031	1,380	0,797	0,553	0,401	0,300	0,357	0,407	0,195
99	1,080	0,940	0,970	1,420	0,710	0,550	0,410	0,310	0,330	0,430	0,180
100	1,100	1,000	0,918	1,460	0,622	0,555	0,419	0,320	0,305	0,445	0,174
101	1,140	1,014	0,943	1,510	0,645	0,549	0,445	0,361	0,312	0,426	0,167
102	1,140	0,978	0,885	1,480	0,646	0,567	0,451	0,333	0,303	0,402	0,179
103	1,030	0,931	0,932	1,500	0,621	0,527	0,429	0,328	0,287	0,402	0,186
104	1,080	0,931	0,883	1,510	0,596	0,536	0,431	0,310	0,320	0,397	0,172
105	1,040	0,916	0,951	1,410	0,653	0,509	0,450	0,289	0,324	0,399	0,165
106	1,080	0,957	0,919	1,510	0,663	0,538	0,432	0,322	0,329	0,408	0,176
107	1,110	0,953	0,929	1,450	0,651	0,531	0,447	0,305	0,336	0,406	0,177
108	1,000	0,906	0,953	1,500	0,694	0,495	0,437	0,309	0,336	0,379	0,171
109	1,070	0,945	0,935	1,420	0,623	0,505	0,409	0,290	0,345	0,398	0,178
110	1,050	0,910	0,956	1,400	0,642	0,517	0,414	0,319	0,298	0,403	0,177
111	1,280	1,067	1,123	1,650	0,799	0,596	0,477	0,398	0,391	0,481	0,204
112	1,310	1,081	1,171	1,700	0,779	0,580	0,503	0,381	0,411	0,461	0,195
113	1,220	0,967	1,023	1,580	0,766	0,543	0,460	0,336	0,358	0,449	0,185

114	1,370	1,125	0,997	1,640	0,735	0,601	0,516	0,403	0,361	0,461	0,214
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
115	1,380	1,161	0,973	1,690	0,810	0,603	0,461	0,409	0,379	0,462	0,179
116	1,380	1,177	1,087	1,680	0,751	0,613	0,479	0,396	0,369	0,472	0,200
117	1,270	1,059	0,977	1,590	0,723	0,584	0,477	0,344	0,336	0,463	0,188
118	1,400	1,154	1,146	1,700	0,808	0,615	0,504	0,409	0,370	0,464	0,210
119	1,330	1,150	1,144	1,620	0,786	0,631	0,483	0,375	0,383	0,489	0,224
120	1,180	1,027	1,012	1,540	0,691	0,549	0,484	0,335	0,385	0,431	0,200
121	1,140	0,999	1,043	1,570	0,713	0,528	0,455	0,316	0,337	0,445	0,178
122	1,180	1,020	1,025	1,550	0,739	0,540	0,472	0,320	0,403	0,435	0,179
123	1,170	1,009	1,090	1,570	0,762	0,575	0,463	0,306	0,412	0,431	0,180
124	1,220	0,991	1,085	1,590	0,779	0,547	0,466	0,335	0,394	0,475	0,173
125	1,220	1,046	1,099	1,520	0,767	0,572	0,465	0,340	0,383	0,459	0,193
126	1,190	1,006	1,121	1,530	0,784	0,575	0,445	0,341	0,421	0,467	0,207
127	1,270	1,065	0,970	1,620	0,759	0,570	0,497	0,403	0,335	0,459	0,187
128	1,250	1,035	1,013	1,590	0,683	0,565	0,464	0,371	0,356	0,463	0,197
129	1,190	1,016	0,951	1,540	0,673	0,541	0,467	0,317	0,356	0,409	0,187
130	1,080	0,943	0,997	1,440	0,737	0,593	0,455	0,322	0,345	0,421	0,192
131	1,110	0,930	1,009	1,420	0,711	0,534	0,454	0,326	0,342	0,401	0,177
132	1,140	0,992	1,039	1,480	0,749	0,546	0,437	0,336	0,333	0,450	0,197
133	1,160	0,993	1,117	1,500	0,793	0,569	0,478	0,366	0,377	0,408	0,185
134	1,180	0,984	1,075	1,520	0,716	0,519	0,435	0,336	0,355	0,425	0,193
135	1,220	1,017	1,065	1,530	0,799	0,544	0,471	0,350	0,365	0,413	0,207
136	1,160	1,023	0,967	1,510	0,698	0,566	0,466	0,368	0,333	0,451	0,177
137	1,130	0,957	1,008	1,530	0,669	0,563	0,465	0,359	0,357	0,412	0,191
138	1,090	0,971	0,965	1,500	0,691	0,559	0,420	0,333	0,354	0,425	0,189
139	1,210	0,961	1,026	1,570	0,708	0,545	0,449	0,321	0,351	0,414	0,183
140	1,160	0,928	0,964	1,450	0,680	0,545	0,432	0,351	0,339	0,388	0,189
141	1,100	0,901	1,036	1,480	0,745	0,544	0,443	0,331	0,355	0,444	0,183
142	1,150	0,924	1,059	1,500	0,738	0,561	0,462	0,344	0,363	0,438	0,191
143	1,150	0,916	1,103	1,490	0,763	0,563	0,441	0,340	0,365	0,415	0,209
144	1,190	0,994	1,048	1,510	0,761	0,560	0,446	0,341	0,399	0,431	0,177
145	1,190	0,978	1,071	1,460	0,757	0,570	0,481	0,360	0,353	0,447	0,196
146	1,240	1,003	1,016	1,580	0,741	0,576	0,477	0,409	0,361	0,423	0,191
147	1,240	1,069	1,040	1,580	0,721	0,648	0,505	0,387	0,357	0,442	0,179
148	1,290	1,030	1,109	1,600	0,749	0,561	0,487	0,403	0,367	0,452	0,185
149	1,270	0,960	1,044	1,670	0,795	0,574	0,463	0,375	0,373	0,471	0,187

150	1,260	1,083	0,864	1,590	0,671	0,553	0,492	0,376	0,293	0,435	0,181
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
151	1,180	0,974	1,037	1,560	0,758	0,601	0,476	0,395	0,367	0,475	0,197
152	1,180	0,987	1,048	1,560	0,740	0,585	0,477	0,391	0,379	0,476	0,195
153	1,190	0,964	1,066	1,510	0,776	0,587	0,468	0,357	0,399	0,406	0,200
155	1,220	1,070	0,980	1,580	0,740	0,570	0,470	0,380	0,360	0,430	0,180
156	1,250	1,171	0,902	1,650	0,709	0,551	0,478	0,399	0,322	0,450	0,155
157	1,180	0,933	1,089	1,480	0,791	0,605	0,493	0,359	0,369	0,443	0,189
158	1,310	1,105	0,977	1,580	0,754	0,582	0,455	0,393	0,325	0,430	0,201
159	1,310	1,162	0,963	1,660	0,756	0,613	0,496	0,428	0,341	0,471	0,196
160	1,250	1,101	0,953	1,600	0,713	0,615	0,463	0,380	0,368	0,430	0,167
161	1,370	1,124	1,050	1,750	0,765	0,617	0,487	0,436	0,359	0,460	0,197
162	1,290	1,084	1,067	1,670	0,771	0,605	0,484	0,417	0,347	0,461	0,204
163	1,330	1,091	1,043	1,650	0,791	0,648	0,478	0,429	0,353	0,463	0,188
164	1,240	1,025	1,019	1,560	0,731	0,585	0,448	0,376	0,347	0,440	0,195
165	1,270	1,061	1,073	1,660	0,739	0,609	0,483	0,417	0,372	0,458	0,169
166	1,350	1,163	1,084	1,710	0,775	0,645	0,487	0,437	0,409	0,471	0,178
167	1,250	1,113	1,083	1,620	0,736	0,617	0,501	0,409	0,387	0,443	0,192
168	1,250	1,065	1,081	1,650	0,765	0,578	0,488	0,388	0,343	0,461	0,197
169	1,260	1,100	1,050	1,660	0,770	0,590	0,490	0,400	0,330	0,450	0,190
170	1,280	1,137	1,021	1,670	0,775	0,602	0,500	0,411	0,325	0,429	0,187
171	1,200	1,071	1,001	1,580	0,686	0,578	0,470	0,403	0,356	0,464	0,175
172	1,370	1,160	1,105	1,730	0,797	0,658	0,495	0,451	0,347	0,440	0,202
173	1,200	1,040	1,057	1,570	0,748	0,568	0,475	0,389	0,360	0,439	0,209
174	1,280	1,063	1,079	1,700	0,759	0,643	0,503	0,444	0,351	0,463	0,179
175	1,210	1,034	1,109	1,580	0,798	0,615	0,467	0,401	0,358	0,457	0,212
176	1,400	1,130	1,124	1,700	0,827	0,637	0,511	0,471	0,367	0,479	0,201
177	1,230	1,012	1,069	1,630	0,739	0,600	0,457	0,381	0,355	0,434	0,177
178	1,250	1,047	1,123	1,620	0,761	0,587	0,482	0,380	0,373	0,413	0,193
179	1,270	1,073	1,090	1,590	0,765	0,600	0,489	0,413	0,373	0,427	0,202
180	1,230	1,023	1,021	1,630	0,770	0,571	0,492	0,393	0,387	0,438	0,190
181	1,330	1,079	1,154	1,740	0,883	0,657	0,524	0,432	0,409	0,457	0,219
182	1,320	1,073	1,153	1,590	0,845	0,683	0,508	0,434	0,401	0,481	0,189
183	1,380	1,191	1,206	1,720	0,805	0,645	0,531	0,453	0,397	0,492	0,214
184	1,280	1,116	1,111	1,660	0,779	0,633	0,520	0,442	0,362	0,481	0,211
185	1,390	1,208	0,966	1,700	0,753	0,644	0,507	0,436	0,333	0,471	0,177
186	1,330	1,093	1,118	1,670	0,864	0,553	0,505	0,439	0,372	0,470	0,197

187	1,320	1,100	1,130	1,680	0,830	0,600	0,500	0,440	0,390	0,480	0,210
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
188	1,320	1,098	1,139	1,690	0,793	0,651	0,489	0,431	0,410	0,495	0,213
189	1,330	1,094	1,094	1,660	0,841	0,650	0,505	0,455	0,409	0,451	0,208
190	1,260	1,057	1,065	1,690	0,769	0,576	0,492	0,452	0,369	0,446	0,204
191	1,260	1,067	1,069	1,620	0,765	0,613	0,471	0,405	0,378	0,424	0,193
192	1,220	1,019	1,094	1,580	0,783	0,613	0,455	0,379	0,404	0,442	0,194
193	1,320	1,086	1,189	1,690	0,888	0,617	0,481	0,442	0,394	0,465	0,223
194	1,290	1,094	1,212	1,630	0,848	0,639	0,507	0,438	0,383	0,445	0,201
195	1,290	1,090	1,170	1,650	0,860	0,630	0,500	0,430	0,400	0,460	0,190
196	1,300	1,077	1,118	1,670	0,867	0,616	0,484	0,429	0,419	0,473	0,179
197	1,390	1,077	1,115	1,690	0,812	0,633	0,507	0,469	0,384	0,449	0,179
198	1,370	1,066	1,163	1,630	0,875	0,658	0,527	0,407	0,434	0,461	0,209
199	1,320	1,043	1,131	1,630	0,838	0,624	0,513	0,396	0,379	0,446	0,211
200	1,280	1,135	1,054	1,690	0,737	0,633	0,507	0,463	0,348	0,471	0,197
201	1,320	1,113	1,100	1,730	0,844	0,697	0,505	0,468	0,349	0,481	0,219
202	1,260	1,056	1,067	1,640	0,787	0,611	0,481	0,434	0,391	0,445	0,189
203	1,350	1,103	1,103	1,630	0,839	0,672	0,500	0,465	0,407	0,464	0,207
204	1,300	1,086	1,099	1,600	0,781	0,627	0,489	0,433	0,410	0,455	0,187
205	1,310	1,092	1,074	1,630	0,800	0,665	0,509	0,455	0,376	0,443	0,203
206	1,340	1,103	1,094	1,690	0,850	0,642	0,477	0,454	0,390	0,465	0,184
207	1,290	1,140	1,134	1,640	0,825	0,649	0,518	0,413	0,379	0,464	0,189
208	1,350	1,056	1,144	1,690	0,810	0,591	0,480	0,387	0,382	0,433	0,199
209	1,380	1,100	1,205	1,730	0,849	0,683	0,541	0,438	0,417	0,465	0,197
210	1,270	1,036	1,116	1,610	0,818	0,629	0,474	0,403	0,404	0,457	0,218
211	1,260	1,063	1,157	1,610	0,899	0,663	0,485	0,425	0,421	0,475	0,207
212	1,250	0,995	1,107	1,480	0,901	0,593	0,461	0,395	0,416	0,459	0,185
213	1,190	1,016	1,145	1,480	0,861	0,629	0,508	0,378	0,368	0,443	0,184
214	1,250	1,038	1,125	1,450	0,967	0,605	0,455	0,391	0,411	0,489	0,214
215	1,310	1,012	1,174	1,490	0,975	0,615	0,487	0,367	0,450	0,483	0,225
216	1,260	1,053	1,161	1,460	0,990	0,665	0,476	0,417	0,440	0,471	0,206
217	1,260	0,991	1,197	1,500	1,084	0,647	0,527	0,427	0,460	0,507	0,181
218	1,330	1,069	1,193	1,510	1,094	0,625	0,508	0,409	0,463	0,498	0,237
219	1,360	1,169	1,127	1,660	0,865	0,648	0,543	0,433	0,425	0,478	0,205
220	1,340	1,083	1,175	1,640	0,856	0,639	0,525	0,435	0,417	0,504	0,203
221	1,300	1,046	1,132	1,520	0,947	0,621	0,539	0,427	0,411	0,465	0,206
222	1,360	1,207	0,924	1,710	0,749	0,636	0,499	0,474	0,303	0,461	0,200

223	1,440	1,269	0,888	1,710	0,761	0,617	0,531	0,479	0,321	0,480	0,195
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
224	1,350	1,253	0,964	1,690	0,756	0,644	0,521	0,442	0,349	0,476	0,193
225	1,330	1,195	0,926	1,650	0,767	0,648	0,533	0,417	0,333	0,467	0,184
226	1,380	1,147	1,009	1,700	0,778	0,648	0,507	0,507	0,369	0,465	0,181
227	1,240	1,061	1,022	1,700	0,754	0,625	0,483	0,455	0,331	0,438	0,189
230	1,390	1,154	1,083	1,700	0,809	0,605	0,493	0,453	0,355	0,494	0,191
231	1,370	1,130	1,131	1,750	0,804	0,674	0,508	0,426	0,358	0,469	0,201
232	1,340	1,126	1,113	1,750	0,859	0,676	0,513	0,474	0,391	0,473	0,233
233	1,350	1,102	1,115	1,700	0,761	0,631	0,490	0,415	0,401	0,467	0,207
234	1,340	1,081	1,114	1,690	0,868	0,629	0,509	0,453	0,405	0,498	0,207
235	1,330	1,167	1,029	1,630	0,744	0,621	0,487	0,464	0,327	0,468	0,176
236	1,400	1,175	1,075	1,780	0,799	0,627	0,535	0,498	0,340	0,479	0,186
237	1,370	1,117	1,063	1,700	0,791	0,654	0,523	0,447	0,379	0,441	0,205
238	1,310	1,113	1,052	1,620	0,735	0,599	0,452	0,466	0,313	0,436	0,200
239	1,320	1,114	1,049	1,690	0,781	0,659	0,477	0,438	0,335	0,418	0,181
240	1,310	1,095	1,079	1,660	0,803	0,595	0,533	0,457	0,356	0,459	0,190
241	1,320	1,131	1,114	1,700	0,789	0,652	0,508	0,464	0,387	0,474	0,225
242	1,300	1,077	1,114	1,670	0,822	0,681	0,486	0,459	0,403	0,477	0,194
244	1,300	1,079	1,127	1,680	0,843	0,651	0,486	0,416	0,413	0,455	0,201
245	1,320	0,975	1,089	1,560	0,797	0,617	0,481	0,407	0,396	0,433	0,203
246	1,220	1,026	1,084	1,570	0,783	0,583	0,498	0,407	0,399	0,469	0,189
247	1,220	1,019	1,095	1,560	0,823	0,601	0,500	0,387	0,406	0,455	0,199
248	1,330	1,061	1,173	1,610	0,884	0,633	0,481	0,421	0,424	0,432	0,185
249	1,290	1,003	1,094	1,620	0,853	0,604	0,482	0,385	0,387	0,427	0,215
250	1,310	1,022	1,139	1,560	0,883	0,642	0,498	0,427	0,393	0,468	0,196
251	1,240	1,027	1,163	1,500	0,884	0,636	0,475	0,407	0,429	0,441	0,176
252	1,230	1,031	1,025	1,580	0,776	0,601	0,483	0,401	0,344	0,426	0,169
253	1,260	1,032	1,062	1,620	0,773	0,645	0,491	0,424	0,371	0,451	0,180
254	1,270	1,025	1,111	1,620	0,779	0,631	0,444	0,401	0,367	0,448	0,209
255	1,230	1,065	1,087	1,660	0,803	0,585	0,493	0,411	0,363	0,482	0,200
256	1,290	1,051	1,131	1,610	0,791	0,568	0,495	0,387	0,373	0,437	0,181
257	1,260	1,017	1,073	1,640	0,804	0,611	0,496	0,427	0,380	0,456	0,191
258	1,280	1,073	1,117	1,620	0,832	0,643	0,519	0,435	0,397	0,469	0,187
259	1,220	0,980	1,052	1,550	0,771	0,599	0,443	0,365	0,385	0,408	0,188
260	1,210	1,022	1,142	1,550	0,863	0,621	0,491	0,411	0,428	0,464	0,203
261	1,200	0,953	1,097	1,480	0,817	0,573	0,485	0,373	0,409	0,428	0,185

262	1,170	0,967	1,107	1,480	0,825	0,597	0,476	0,388	0,388	0,450	0,191
<i>Tabla A3 (continuación)</i>											
MUESTRA	F1	²¹⁴ Bi	²¹² Bi	F2	²¹⁴ Bi	F3	⁴⁰ K	F4	²¹⁴ B	F5	²⁰⁸ Tl
263	1,200	0,985	1,121	1,510	0,871	0,597	0,491	0,369	0,395	0,457	0,211
264	1,230	1,013	1,170	1,510	0,900	0,621	0,465	0,392	0,402	0,429	0,179
265	1,200	0,990	1,074	1,500	0,889	0,568	0,448	0,361	0,405	0,449	0,201
266	1,210	0,949	1,154	1,460	0,873	0,597	0,463	0,381	0,386	0,441	0,206
268	1,170	0,986	1,103	1,390	0,898	0,564	0,467	0,375	0,410	0,409	0,209
269	1,190	0,976	1,086	1,410	0,849	0,626	0,483	0,349	0,387	0,445	0,176
270	1,160	0,979	0,956	1,540	0,706	0,559	0,451	0,368	0,324	0,401	0,195
271	1,210	1,034	1,051	1,560	0,717	0,566	0,473	0,388	0,336	0,428	0,168
272	1,200	0,971	1,131	1,460	0,867	0,556	0,507	0,375	0,420	0,437	0,175
273	1,270	0,977	1,114	1,500	0,899	0,584	0,481	0,368	0,401	0,464	0,193
274	1,140	0,987	1,114	1,420	0,897	0,575	0,495	0,372	0,390	0,435	0,179
275	1,210	1,000	1,118	1,500	0,897	0,613	0,433	0,399	0,425	0,410	0,205
276	1,210	0,965	1,110	1,450	0,918	0,573	0,432	0,385	0,401	0,438	0,195
277	1,140	0,976	1,099	1,430	0,911	0,589	0,469	0,359	0,385	0,481	0,175
278	1,200	0,969	1,166	1,510	0,956	0,628	0,490	0,387	0,427	0,440	0,194
279	1,210	0,981	1,077	1,460	0,961	0,631	0,471	0,393	0,428	0,460	0,206
280	1,230	1,107	1,069	1,600	0,777	0,602	0,493	0,380	0,363	0,503	0,194
281	1,180	1,020	1,057	1,590	0,702	0,573	0,486	0,398	0,344	0,446	0,185
282	1,190	1,020	1,003	1,560	0,729	0,566	0,452	0,377	0,344	0,433	0,167
283	1,160	0,979	0,971	1,550	0,733	0,541	0,437	0,383	0,373	0,413	0,178
284	1,210	1,025	1,063	1,680	0,771	0,583	0,443	0,416	0,377	0,450	0,181
286	1,230	1,029	1,079	1,490	0,785	0,609	0,508	0,373	0,357	0,465	0,208
287	1,210	0,914	1,083	1,540	0,843	0,571	0,463	0,339	0,401	0,433	0,200
288	1,190	0,957	1,089	1,470	0,815	0,559	0,456	0,328	0,392	0,425	0,183
290	1,340	1,192	0,845	1,610	0,671	0,589	0,522	0,432	0,295	0,420	0,175
291	1,210	1,177	0,875	1,570	0,661	0,557	0,496	0,407	0,288	0,445	0,169
292	1,210	1,093	0,864	1,500	0,658	0,558	0,463	0,376	0,281	0,415	0,165
293	1,320	1,163	0,966	1,670	0,727	0,613	0,487	0,411	0,320	0,477	0,186
294	1,200	1,023	0,875	1,490	0,672	0,548	0,458	0,352	0,281	0,424	0,165
295	1,210	1,085	0,937	1,570	0,715	0,552	0,451	0,441	0,322	0,399	0,199
296	1,140	1,015	1,025	1,590	0,714	0,578	0,481	0,375	0,339	0,418	0,178
298	1,170	1,027	1,017	1,540	0,729	0,567	0,481	0,386	0,338	0,439	0,176
299	1,180	0,967	1,017	1,520	0,699	0,565	0,444	0,367	0,356	0,428	0,178

Tabla A4. Composición química del pozo 1

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
spt-0,20	38,0	0,021	5,19	1,45	0,020	37,1	< 1	0,503	< 20
spt-1,55	63,4	0,058	8,44	2,88	0,040	13,2	< 1	0,583	69
spt-2,55	67,9	0,026	7,81	2,31	0,048	11,5	< 1	0,281	23
spt-5,55	63,5	0,110	10,4	3,54	0,045	12,2	< 1	0,314	25
spt-10,55	57,5	0,196	12,6	3,78	0,064	13,2	< 1	0,789	< 20
spt-12,55	70,7	0,022	9,15	2,87	0,030	6,77	< 1	0,249	< 20
spt-13,55	57,3	0,024	7,99	2,42	0,025	19,0	< 1	0,329	34
spt-14,55	63,7	0,564	16,8	6,13	0,018	0,564	< 1	2,16	292
spt-16,55	70,4	0,084	9,75	4,26	0,022	3,62	< 1	0,368	101
spt-17,20	85,6	0,036	4,40	0,297	0,019	0,286	< 1	< 0,01	20
spt-23,55	82,6	< 0,01	5,56	3,21	0,038	0,706	< 1	0,084	37
spt-25,55	58,0	0,594	13,6	9,79	0,018	0,448	< 1	1,44	278
spt-26	59,3	0,680	15,9	1,40	< 0,01	7,60	< 1	1,38	282
spt-27,55	63,6	0,636	16,9	4,23	< 0,01	1,98	< 1	1,39	269
spt-28,55	83,3	0,050	5,92	1,07	0,019	0,319	< 1	0,075	53
spt-29,55	64,9	0,575	15,1	6,17	0,010	1,55	< 1	1,28	240
spt-35,55	61,5	0,688	16,5	6,91	0,050	0,525	< 1	1,69	265
spt-38,55	63,3	0,630	17,2	6,03	0,072	0,538	< 1	1,77	184
spt-44,55	65,2	0,508	15,5	6,44	0,013	0,615	< 1	1,62	191
spt-47,55	62,2	0,657	17,0	6,42	0,057	0,631	< 1	1,73	191
spt-53,55	63,6	0,615	16,5	5,46	0,037	1,48	< 1	1,51	234
spt-56,55	70,0	0,164	11,2	3,65	0,026	3,78	< 1	0,574	84
spt-59,55	64,4	0,578	14,7	5,57	0,046	0,638	< 1	1,29	238
spt-62,55	74,4	0,118	9,28	3,36	0,021	2,00	< 1	0,517	25
spt-68,55	69,5	0,535	12,9	4,69	0,027	0,611	< 1	1,01	217
spt-74,55	66,4	0,573	15,9	6,27	0,025	0,752	< 1	1,27	223
spt-77,55	65,8	0,555	14,2	5,38	0,017	0,832	< 1	1,22	234
spt-80,55	75,0	0,125	8,62	3,80	0,039	1,09	< 1	0,358	81
spt-83,55	68,7	0,512	14,4	5,47	0,107	0,733	< 1	1,15	174
spt-85,55	68,4	0,369	12,8	5,15	0,065	0,659	< 1	0,978	178
spt-87	81,9	0,228	6,68	2,15	0,023	0,329	< 1	0,038	< 20
spt-89	84,3	< 0,01	4,31	0,895	0,023	0,333	< 1	0,026	44

Tabla A5. Composición química del pozo 3

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
10	63,9	0,051	9,76	2,33	0,031	12,1	< 1	0,395	< 20
11	74,7	0,018	8,80	2,35	0,035	4,91	< 1	0,287	< 20
12	59,6	< 0,01	8,77	2,52	0,071	15,8	< 1	0,278	< 20
13	66,1	0,113	10,7	2,57	0,030	10,4	< 1	0,530	29
14	56,5	0,070	9,28	2,87	0,028	19,0	< 1	0,480	< 20
15	66,4	0,082	10,1	4,29	0,130	6,76	< 1	0,348	< 20
16	67,0	0,118	9,32	5,05	0,118	7,91	< 1	0,352	63
17	66,4	0,123	10,6	4,42	0,039	8,91	< 1	0,323	48
18	74,4	0,087	10,6	3,66	0,050	2,89	< 1	0,380	43
19	69,5	0,187	11,6	4,01	0,043	3,08	< 1	0,503	67
20	69,3	0,153	9,75	4,05	0,028	4,01	< 1	0,404	36
21	62,8	0,221	12,7	4,32	0,056	8,19	< 1	0,563	< 20
22	70,2	0,086	10,9	3,69	0,030	4,81	< 1	0,369	34
23	74,7	0,098	9,29	3,42	0,034	1,85	< 1	0,329	95
24	72,6	0,200	11,5	3,58	0,030	2,25	< 1	0,556	100
26	72,2	0,083	8,77	2,54	0,037	4,78	< 1	0,351	51
27	74,0	0,055	8,51	2,61	0,023	3,46	< 1	0,341	43
28	68,2	0,306	13,0	4,16	0,020	4,21	< 1	0,790	146
30	68,2	0,436	14,0	5,01	0,045	1,90	< 1	1,00	187
32	71,4	0,238	11,8	3,74	0,062	0,948	< 1	0,745	153
33	74,9	0,184	11,9	3,45	0,043	0,620	< 1	0,649	119
34	71,2	0,334	12,1	4,49	0,052	1,58	< 1	0,906	122
37	72,6	0,285	11,6	3,85	0,042	1,02	< 1	0,890	128
41	69,0	0,305	13,0	4,20	0,033	1,61	< 1	0,927	185
42	70,1	0,345	12,4	4,49	0,036	1,87	< 1	0,899	167
43	67,3	0,449	13,7	5,00	0,044	1,81	< 1	1,15	199
44	67,9	0,377	13,1	4,76	0,053	1,81	< 1	1,06	195
45	74,9	0,178	10,7	3,37	0,046	1,50	< 1	0,684	97
46	76,3	0,188	11,1	3,35	0,030	0,768	< 1	0,709	119
47	75,6	0,154	11,1	3,73	0,040	0,674	< 1	0,624	111
48	73,1	0,247	11,3	4,28	0,036	0,910	< 1	0,822	171
50	72,7	0,275	11,6	4,05	0,030	0,818	< 1	0,860	103
51	67,4	0,397	14,9	4,97	0,036	0,98	< 1	1,11	144
53	74,9	0,149	10,7	3,60	0,034	0,765	< 1	0,646	53
54	71,2	0,265	11,8	3,90	0,054	2,45	< 1	0,823	125
55	72,3	0,116	10,5	3,43	0,033	2,51	< 1	0,522	78
56	71,5	0,217	11,7	3,88	0,062	2,37	< 1	0,792	83
57	76,3	0,077	10,5	2,93	0,024	1,01	< 1	0,510	76
61	76,2	0,091	9,44	3,09	0,030	0,926	< 1	0,456	135
62	79,1	0,045	8,13	2,65	0,027	0,670	< 1	0,367	123
67	74,4	0,146	10,4	3,32	0,035	1,60	< 1	0,550	114
68	73,0	0,167	9,98	3,46	0,040	1,22	< 1	0,559	101
70	68,9	0,298	12,3	4,50	0,038	1,30	< 1	0,911	154
72	65,5	0,454	14,3	5,25	0,028	0,950	< 1	1,13	223
73	67,2	0,395	12,5	4,77	0,050	0,960	< 1	0,960	202
74	74,1	0,208	11,0	3,97	0,041	1,04	< 1	0,661	156

Tabla A5 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
75	70,9	0,279	12,2	4,27	0,045	1,30	< 1	0,751	139
76	70,9	0,245	11,4	4,37	0,048	1,44	< 1	0,739	173
78	74,9	0,206	10,7	3,76	0,029	1,30	< 1	0,593	121
79	71,2	0,365	11,7	4,96	0,036	0,902	< 1	0,959	183
80	69,9	0,359	12,9	4,56	0,033	1,05	< 1	0,915	143
82	70,5	0,204	10,8	4,32	0,046	0,970	< 1	0,627	151
83	70,6	0,292	12,6	4,36	0,050	0,712	< 1	0,861	146
85	70,9	0,297	12,3	4,29	0,040	0,800	< 1	0,783	170
86	71,5	0,206	10,6	4,11	0,041	0,766	< 1	0,743	115
87	74,2	0,160	10,0	3,84	0,042	0,782	< 1	0,567	98
88	73,3	0,229	11,5	4,11	0,045	0,666	< 1	0,688	128
89	72,9	0,230	10,8	4,04	0,039	0,831	< 1	0,643	105
90	70,0	0,250	12,3	3,97	0,057	0,671	< 1	0,819	198
91	66,4	0,414	12,8	5,26	0,058	0,648	< 1	1,01	214
92	68,7	0,358	12,3	4,77	0,040	0,598	< 1	0,901	181
93	73,9	0,182	10,9	3,38	0,039	1,34	< 1	0,652	95
94	69,9	0,239	12,3	4,17	0,036	0,635	< 1	0,793	159
95	71,2	0,276	12,1	4,95	0,076	0,579	< 1	0,811	176
96	69,3	0,257	11,8	4,56	0,042	0,556	< 1	0,852	164
97	78,0	0,139	10,3	3,53	0,030	0,476	< 1	0,430	69
98	77,6	0,163	8,82	3,08	0,038	0,530	< 1	0,537	98
99	75,0	0,188	10,4	3,79	0,063	0,516	< 1	0,623	151
100	68,3	0,291	12,4	4,55	0,123	0,577	< 1	0,992	192
101	72,2	0,288	12,6	4,41	0,067	0,868	< 1	0,733	175
102	71,0	0,189	11,7	4,00	0,048	0,658	< 1	0,725	143
103	72,2	0,207	12,1	3,82	0,034	1,76	< 1	0,679	141
104	61,0	0,371	14,6	5,11	0,044	6,15	< 1	1,03	129

Tabla A6. Composición química del pozo 6

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
01	58,7	0,070	8,66	4,52	0,024	18,7	< 1	0,552	< 20
02	45,4	0,120	9,24	3,10	0,021	26,5	< 1	1,12	< 20
03	46,6	0,197	12,3	3,54	0,023	23,6	< 1	1,05	< 20
04	59,3	0,193	11,7	2,48	0,012	17,2	< 1	0,674	< 20
05	55,8	0,027	7,60	2,65	0,022	20,5	< 1	0,443	< 20
06	52,3	0,303	13,5	3,27	0,021	20,0	< 1	1,02	< 20
08	52,0	0,377	12,0	3,05	0,012	18,9	< 1	0,856	< 20
09	48,6	0,191	12,0	2,04	0,022	26,2	< 1	0,759	< 20
010	47,0	0,124	8,01	3,72	0,020	25,6	< 1	0,607	< 20
011	51,1	0,349	13,9	3,00	0,010	22,1	< 1	0,869	< 20
012	50,1	0,102	9,71	4,14	0,021	25,3	< 1	0,650	< 20
013	44,3	0,206	12,0	3,71	0,019	25,1	< 1	0,832	28
014	50,3	0,142	10,4	5,02	0,018	23,2	< 1	0,734	< 20
015	52,0	< 0,01	8,37	3,18	0,025	25,5	< 1	0,531	< 20
016	49,3	0,040	7,68	3,04	0,024	28,3	< 1	0,612	< 20
018	43,1	0,129	9,42	2,44	0,027	29,4	< 1	0,768	25
019	43,7	0,069	8,84	2,60	0,022	29,2	< 1	0,659	< 20
020	51,2	0,100	8,11	2,59	0,016	23,2	< 1	0,615	< 20
021	49,3	0,203	10,8	2,60	0,019	25,7	< 1	0,836	< 20
023	44,9	0,234	12,0	2,55	0,017	26,0	< 1	0,956	< 20
024	47,6	0,162	11,2	2,57	0,028	25,3	< 1	0,747	< 20
025	48,5	0,204	12,3	2,70	0,026	24,7	< 1	0,885	< 20
026	50,9	0,036	7,20	2,87	0,012	27,0	< 1	0,558	< 20
027	46,0	0,098	8,69	2,47	0,019	27,9	< 1	0,791	< 20
028	48,5	0,089	8,58	2,99	0,019	25,3	< 1	0,757	46
029	48,1	0,090	9,80	3,38	0,025	26,8	< 1	0,755	< 20
030	48,5	0,176	10,9	2,66	0,019	26,1	< 1	0,937	< 20
032	50,1	0,066	9,41	2,54	0,021	26,6	< 1	0,739	< 20
033	49,1	0,060	7,91	2,22	0,025	25,6	< 1	0,650	< 20
034	44,4	0,091	9,76	2,38	0,019	27,6	< 1	0,850	< 20
035	46,4	0,051	8,67	2,83	0,016	27,6	< 1	0,716	< 20
036	45,7	0,074	8,63	2,41	0,018	28,5	< 1	0,709	< 20
037	49,5	0,020	8,25	2,31	0,021	25,7	< 1	0,605	< 20
038	51,4	0,034	7,50	2,60	0,019	26,5	< 1	0,625	< 20
039	48,1	0,190	11,8	2,91	0,022	22,9	< 1	0,927	< 20
040	50,8	0,366	12,7	3,48	0,033	18,5	< 1	1,17	< 20
041	52,6	0,358	12,6	4,13	0,020	16,2	< 1	1,34	< 20
042	51,0	0,170	8,70	3,02	0,030	24,5	< 1	0,992	< 20
043	57,2	0,158	10,5	3,53	0,026	18,8	< 1	0,884	21
044	48,3	0,183	10,4	3,23	0,024	23,3	< 1	0,974	< 20
045	50,3	0,159	10,8	3,14	0,018	23,9	< 1	0,936	< 20
046	62,2	< 0,01	6,01	3,04	0,025	19,1	< 1	0,355	< 20
047	47,8	0,154	11,1	3,36	0,025	23,2	< 1	0,922	< 20
048	46,2	0,093	8,56	2,95	0,027	27,2	< 1	0,809	< 20
049	49,3	0,069	9,20	3,01	0,018	26,4	< 1	0,773	< 20

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
050	47,2	0,074	8,57	2,57	0,020	28,6	< 1	0,802	< 20
051	50,0	0,061	7,61	2,76	0,020	28,0	< 1	0,693	28
052	47,7	0,246	11,5	2,86	0,019	22,9	< 1	1,00	< 20
053	49,4	0,052	6,98	4,58	0,023	23,9	< 1	0,584	< 20
054	49,1	0,054	9,90	2,80	0,025	24,3	< 1	0,709	< 20
055	49,9	0,130	9,70	4,30	0,019	23,7	< 1	0,892	< 20
056	49,4	0,098	10,3	2,72	0,026	23,0	< 1	0,830	< 20
057	49,8	0,269	12,5	3,81	0,016	20,1	< 1	1,19	< 20
058	47,5	0,251	14,4	4,46	0,019	20,2	< 1	1,12	29
059	50,2	0,054	8,71	3,57	0,030	22,6	< 1	0,705	< 20
060	53,1	0,011	9,39	3,56	0,020	23,9	< 1	0,594	< 20
061	52,0	0,035	9,99	3,53	0,024	24,4	< 1	0,674	< 20
062	51,7	0,081	11,7	3,48	0,019	22,5	< 1	0,753	< 20
063	48,8	0,204	12,9	3,26	0,025	21,2	< 1	1,00	37
064	49,2	0,056	10,1	3,37	0,026	23,3	< 1	0,627	< 20
065	53,0	0,049	8,26	2,21	0,023	23,4	< 1	0,595	< 20
066	54,0	0,015	8,18	3,49	0,028	23,8	< 1	0,545	< 20
067	54,1	0,047	9,71	3,21	0,023	22,8	< 1	0,588	< 20
068	50,0	0,137	12,2	3,09	0,022	22,4	< 1	0,836	< 20
069	54,5	0,042	9,09	3,05	0,020	23,2	< 1	0,596	27
070	51,0	0,091	11,0	3,54	0,022	22,9	< 1	0,770	< 20
071	48,4	0,070	9,49	2,95	0,026	24,4	< 1	0,704	< 20
072	46,4	0,125	10,3	3,82	0,030	24,6	< 1	0,872	< 20
073	49,7	0,095	10,3	4,41	0,022	21,7	< 1	0,773	< 20
074	49,4	< 0,01	8,08	3,78	0,019	24,3	< 1	0,585	< 20
075	51,8	0,046	10,2	4,81	0,023	22,7	< 1	0,631	< 20
077	47,8	0,184	12,3	4,54	0,025	21,4	< 1	1,07	< 20
078	52,6	0,253	12,3	3,54	0,027	20,4	< 1	1,28	< 20
079	50,6	0,366	14,6	4,00	0,026	19,9	< 1	1,60	< 20
080	51,7	0,165	11,3	3,93	0,035	20,4	< 1	1,01	24
081	53,5	0,296	13,9	4,61	0,027	17,1	< 1	1,41	< 20
082	48,1	0,150	10,6	3,76	0,022	22,7	< 1	1,02	44
083	46,6	0,135	11,6	4,08	0,017	23,9	< 1	0,923	< 20
084	49,6	0,045	9,12	3,34	0,023	25,8	< 1	0,757	< 20
085	48,8	0,088	9,85	3,45	0,020	25,9	< 1	0,774	< 20
086	47,6	0,078	8,56	4,14	0,024	25,4	< 1	0,764	< 20
087	47,3	0,076	9,17	3,71	0,033	25,4	< 1	0,711	32
088	48,8	0,031	10,5	3,36	0,022	26,8	< 1	0,649	< 20
089	47,9	0,044	8,07	3,44	0,040	25,2	< 1	0,695	< 20
090	48,0	0,143	10,5	3,98	0,019	23,4	< 1	1,02	< 20
091	49,8	0,164	12,2	3,86	0,026	23,2	< 1	1,06	< 20
092	50,6	0,180	12,2	4,24	0,023	22,7	< 1	1,03	< 20
093	47,2	0,240	12,9	4,08	0,027	21,6	< 1	1,30	< 20
094	43,9	0,110	11,2	3,64	0,023	26,8	< 1	0,929	< 20
095	47,2	0,136	12,9	3,33	0,026	25,2	1,73	0,947	< 20

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
096	47,9	0,086	10,5	3,51	0,034	26,6	< 1	0,854	35
097	48,0	0,382	15,5	4,05	0,034	20,9	< 1	1,72	< 20
098	45,8	0,174	12,7	3,46	0,022	24,4	< 1	1,09	< 20
099	47,6	0,243	13,2	3,58	0,025	24,1	< 1	1,29	< 20
100	43,6	0,218	14,2	4,14	0,020	24,6	< 1	1,29	23
101	42,0	0,222	13,5	3,81	0,021	26,5	< 1	1,19	< 20
102	43,8	0,251	12,7	3,36	0,026	25,0	< 1	1,35	< 20
103	49,8	0,086	10,4	2,59	0,036	25,8	< 1	0,891	< 20
104	46,9	0,167	10,5	3,55	0,028	26,5	< 1	0,978	< 20
105	53,5	0,079	9,18	4,27	0,022	22,0	< 1	0,763	< 20
106	45,3	0,203	10,3	3,64	0,020	24,9	< 1	1,10	< 20
107	50,5	0,148	11,1	3,06	0,016	23,8	< 1	1,06	< 20
108	50,4	0,094	9,01	3,03	0,019	25,0	< 1	0,853	< 20
109	47,7	0,172	11,5	3,69	0,023	23,3	< 1	1,03	< 20
110	50,7	0,080	10,6	3,59	0,025	23,9	< 1	0,873	< 20
111	47,4	0,516	18,9	3,84	0,020	17,0	< 1	1,77	< 20
112	55,6	0,667	16,8	4,06	0,025	12,4	< 1	1,46	141
113	53,0	0,480	15,0	3,64	0,022	16,9	< 1	1,51	61
114	57,7	0,671	17,2	4,00	0,018	11,1	< 1	1,51	85
115	57,0	0,671	17,6	3,93	0,021	11,9	< 1	1,61	86
116	53,5	0,692	17,5	4,07	0,018	12,1	< 1	1,55	114
117	54,7	0,725	18,0	4,14	0,023	12,7	< 1	1,70	86
118	55,6	0,579	17,5	3,65	0,019	14,2	< 1	1,29	116
119	54,9	0,623	16,4	3,58	0,022	12,4	< 1	1,29	137
120	57,6	0,238	12,1	2,41	0,012	17,9	< 1	0,850	< 20
121	54,0	0,465	15,1	3,64	0,012	16,6	< 1	1,26	< 20
122	52,6	0,340	14,2	2,86	0,020	18,2	< 1	1,01	< 20
123	48,7	0,543	16,3	3,58	0,020	17,2	< 1	1,43	37
124	50,2	0,475	15,8	3,54	0,025	16,7	< 1	1,38	36
125	52,3	0,382	14,5	3,54	0,019	16,7	< 1	1,17	66
126	52,0	0,482	14,7	3,69	0,025	15,1	< 1	1,44	68
127	56,0	0,428	14,3	3,74	0,022	15,1	< 1	1,46	< 20
128	57,3	0,316	13,7	3,76	0,023	15,6	< 1	1,17	< 20
129	53,0	0,399	13,5	3,60	0,024	18,0	< 1	1,36	< 20
130	50,0	0,345	13,4	3,56	0,022	19,2	< 1	1,22	34
131	47,8	0,266	12,4	2,92	0,022	22,0	< 1	1,00	< 20
132	51,2	0,321	12,9	3,26	0,022	20,8	< 1	1,02	38
133	50,9	0,417	13,0	3,57	0,031	19,9	< 1	1,54	< 20
134	51,5	0,367	13,9	3,41	0,035	19,6	< 1	1,31	< 20
135	51,3	0,442	14,5	3,44	0,029	16,5	< 1	1,44	86
136	51,0	0,367	13,4	3,35	0,028	18,5	< 1	1,23	79
137	49,3	0,271	12,5	2,74	0,017	21,7	< 1	1,11	< 20
138	48,8	0,361	14,0	3,07	0,028	19,9	< 1	1,25	24
139	50,0	0,371	13,7	3,05	0,030	19,0	< 1	1,14	35
140	49,1	0,341	13,8	3,26	0,022	19,5	< 1	1,19	60

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
141	49,9	0,417	14,5	3,56	0,018	18,5	< 1	1,42	< 20
142	49,9	0,374	14,0	4,23	0,014	17,6	< 1	1,41	40
143	47,6	0,373	14,3	3,79	0,028	19,6	< 1	1,58	< 20
144	51,0	0,327	13,6	3,59	0,025	18,8	< 1	1,28	90
145	51,6	0,402	14,0	3,59	0,028	18,5	< 1	1,70	< 20
146	48,7	0,455	15,0	3,46	0,022	20,5	< 1	1,79	87
147	48,0	0,470	14,7	3,78	0,020	20,9	< 1	1,86	< 20
148	46,8	0,471	15,5	3,75	0,023	21,6	< 1	1,96	34
149	46,5	0,464	15,5	3,74	0,022	20,2	< 1	1,72	31
150	50,7	0,333	14,2	4,62	0,024	20,3	< 1	1,37	< 20
151	45,8	0,402	14,2	3,55	0,017	21,0	< 1	1,59	< 20
152	48,4	0,395	13,3	3,82	0,029	19,7	< 1	1,57	< 20
153	44,8	0,451	14,6	3,89	0,020	21,0	< 1	1,68	< 20
155	49,8	0,394	14,7	3,57	0,027	20,1	< 1	1,60	< 20
156	49,6	0,311	14,7	3,48	0,016	19,1	< 1	1,35	< 20
157	43,0	0,473	15,2	4,35	0,016	21,6	< 1	1,89	< 20
158	48,2	0,448	13,8	3,77	0,020	19,0	< 1	1,59	33
159	45,5	0,563	16,6	4,11	0,020	18,4	< 1	2,18	45
160	46,6	0,608	17,1	4,30	0,035	16,9	< 1	2,38	23
161	46,3	0,628	17,9	4,58	0,029	16,2	< 1	2,47	22
162	48,0	0,603	16,1	4,37	0,016	19,0	< 1	2,21	< 20
163	49,7	0,568	16,6	4,17	0,025	18,4	< 1	2,12	< 20
164	52,5	0,419	15,5	3,90	0,024	17,5	< 1	1,67	43
165	50,8	0,592	16,3	4,18	0,024	16,9	< 1	2,17	80
166	43,3	0,679	17,1	4,35	0,019	18,6	< 1	2,56	46
167	44,0	0,629	16,4	4,16	0,028	20,0	< 1	2,36	26
168	45,9	0,688	16,7	4,66	0,020	19,9	< 1	2,50	22
169	46,0	0,573	16,2	4,22	0,023	20,3	< 1	2,22	37
170	44,6	0,618	16,8	4,46	0,024	19,2	< 1	2,46	< 20
171	43,9	0,635	17,8	4,51	0,029	18,6	< 1	2,42	59
172	46,0	0,648	17,8	4,62	0,028	18,5	< 1	2,53	38
173	54,0	0,258	10,8	2,61	0,022	12,1	< 1	1,49	27
174	45,9	0,637	18,2	4,69	0,031	15,8	< 1	2,66	61
175	50,1	0,626	16,7	4,47	0,031	16,3	< 1	2,46	34
176	47,4	0,755	18,1	4,80	0,032	16,1	< 1	2,83	< 20
177	51,8	0,513	15,6	4,31	0,038	16,4	< 1	2,20	< 20
178	49,6	0,533	15,8	4,27	0,020	17,5	< 1	2,14	< 20
179	49,6	0,626	17,9	4,33	0,027	17,2	< 1	2,38	47
180	47,0	0,616	16,5	4,22	0,022	17,4	< 1	2,35	< 20
181	48,4	0,786	18,0	4,86	0,041	16,3	< 1	2,74	106
182	51,0	0,606	16,8	4,21	0,027	16,8	< 1	2,34	< 20
183	49,7	0,811	16,7	4,94	0,039	15,0	< 1	2,78	73
184	45,6	0,741	16,9	4,79	0,031	16,2	< 1	2,63	97
185	49,9	0,664	18,5	4,41	0,035	16,2	< 1	2,54	51
186	46,3	0,704	17,3	4,74	0,028	18,2	< 1	2,70	61

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
187	46,5	0,617	16,9	4,29	0,026	17,2	< 1	2,43	< 20
188	45,8	0,671	17,4	4,54	0,029	16,7	< 1	2,53	20
189	45,1	0,669	18,2	4,66	0,035	16,6	< 1	2,57	43
190	45,7	0,675	16,8	4,55	0,028	17,0	< 1	2,49	42
191	44,4	0,665	18,3	4,59	0,024	16,9	< 1	2,57	33
192	48,3	0,667	18,5	4,64	0,022	16,6	< 1	2,60	< 20
193	46,3	0,658	16,8	4,50	0,023	16,8	< 1	2,47	< 20
194	48,0	0,677	17,9	4,68	0,033	16,3	< 1	2,59	103
195	48,6	0,693	16,8	4,56	0,025	17,4	< 1	2,54	29
196	44,7	0,672	17,9	4,62	0,031	16,9	< 1	2,58	151
197	47,7	0,722	17,6	4,74	0,029	16,9	< 1	2,60	50
198	51,4	0,675	17,3	4,33	0,027	14,6	< 1	2,24	32
199	46,2	0,715	16,8	4,47	0,026	16,2	< 1	2,29	74
200	47,2	0,683	17,1	4,55	0,028	17,5	< 1	2,57	109
201	46,1	0,663	16,6	4,38	0,017	17,4	< 1	2,48	44
202	45,3	0,673	18,6	4,58	0,025	17,0	< 1	2,56	55
203	45,3	0,661	18,0	4,59	0,027	17,0	< 1	2,53	85
204	45,1	0,650	16,6	4,51	0,022	17,6	< 1	2,47	< 20
205	46,1	0,702	17,0	4,62	0,018	18,9	< 1	2,62	28
206	42,5	0,691	16,9	4,57	0,019	19,1	< 1	2,58	71
207	46,0	0,665	17,8	4,62	0,035	18,8	< 1	2,54	22
208	50,2	0,589	16,0	4,30	0,027	17,3	< 1	2,39	38
209	44,0	0,623	17,4	4,31	0,018	18,4	< 1	2,56	< 20
210	42,1	0,583	16,2	4,34	0,018	20,9	< 1	2,41	< 20
211	46,6	0,594	16,6	4,16	0,014	20,5	< 1	2,40	< 20
212	44,8	0,654	17,2	4,55	0,020	19,8	< 1	2,58	< 20
213	44,8	0,582	16,8	4,07	0,021	19,4	< 1	2,28	< 20
214	46,0	0,487	16,2	3,95	0,029	19,3	< 1	2,05	< 20
215	47,2	0,620	16,4	4,37	0,030	19,6	< 1	2,52	35
216	44,3	0,678	18,8	4,70	0,028	17,4	< 1	2,67	49
217	46,7	0,709	18,3	4,73	0,025	17,9	< 1	2,86	27
218	43,7	0,733	18,2	4,68	0,024	17,8	< 1	2,84	66
219	47,0	0,687	17,5	4,58	0,025	17,9	< 1	2,69	< 20
220	42,6	0,644	18,3	4,86	0,026	18,6	1,19	2,64	67
221	46,8	0,697	18,5	4,74	0,024	17,5	< 1	2,75	60
222	45,9	0,734	18,0	4,94	0,025	18,2	< 1	2,83	< 20
223	46,1	0,715	18,2	5,05	0,024	18,3	< 1	2,89	22
224	42,7	0,757	18,2	5,06	0,031	18,4	< 1	2,88	< 20
225	43,7	0,632	17,1	4,50	0,028	19,6	< 1	2,50	41
226	46,0	0,714	18,3	4,89	0,031	17,5	< 1	2,84	40
227	45,9	0,705	17,9	4,92	0,028	17,8	< 1	2,78	< 20
230	43,1	0,707	18,0	4,94	0,025	18,3	< 1	2,83	61
231	46,0	0,814	18,3	5,29	0,027	17,0	< 1	3,14	34
232	42,7	0,764	18,1	5,02	0,034	17,7	< 1	3,05	109
233	45,5	0,745	18,9	4,93	0,028	17,3	< 1	2,96	90

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
234	42,4	0,725	19,5	4,83	0,025	17,8	< 1	2,89	62
235	43,3	0,735	19,4	4,81	0,035	17,1	< 1	2,89	118
236	47,5	0,724	18,1	4,82	0,027	17,2	< 1	2,90	< 20
237	42,4	0,736	17,6	4,93	0,028	18,1	< 1	2,86	56
238	43,2	0,718	17,5	4,76	0,027	18,2	< 1	2,81	106
239	45,7	0,729	18,1	4,79	0,026	18,0	< 1	2,88	20
240	41,0	0,740	19,9	5,03	0,035	17,7	1,98	2,91	< 20
241	45,4	0,793	18,0	5,25	0,033	17,6	< 1	3,11	50
242	45,3	0,766	18,0	5,03	0,031	18,2	< 1	2,97	67
244	40,8	0,705	17,4	4,69	0,025	20,7	< 1	2,92	33
245	39,2	0,601	16,7	4,42	0,026	23,6	< 1	2,60	< 20
246	38,0	0,567	15,8	4,30	0,022	24,4	< 1	2,42	< 20
247	41,3	0,581	15,7	4,35	0,024	22,2	< 1	2,54	68
248	38,7	0,642	17,2	4,62	0,027	22,7	< 1	2,63	93
249	46,7	0,552	16,2	4,22	0,019	20,2	< 1	2,38	22
250	44,3	0,701	16,9	4,95	0,026	19,8	< 1	2,93	< 20
251	43,1	0,680	17,5	4,60	0,026	21,1	< 1	2,88	< 20
252	42,8	0,590	16,0	5,29	0,025	22,7	< 1	2,47	63
253	42,6	0,547	16,3	4,92	0,023	23,8	< 1	2,34	35
254	43,1	0,509	16,1	5,09	0,026	22,9	< 1	2,22	< 20
255	43,0	0,535	14,7	4,76	0,044	21,5	< 1	2,23	75
256	42,2	0,506	15,7	4,51	0,030	24,6	< 1	2,19	< 20
257	40,2	0,537	16,2	4,57	0,034	23,9	< 1	2,25	< 20
258	41,0	0,627	16,8	4,72	0,027	21,5	< 1	2,63	48
259	42,8	0,594	17,8	4,69	0,028	22,4	< 1	2,48	< 20
260	40,5	0,596	16,3	4,62	0,031	22,6	< 1	2,41	30
261	43,2	0,566	17,2	4,52	0,031	23,0	< 1	2,36	27
262	38,6	0,561	16,4	4,56	0,023	24,8	< 1	2,27	< 20
263	38,8	0,490	15,4	4,42	0,018	25,5	< 1	2,04	< 20
264	43,6	0,618	16,3	5,01	0,027	22,5	< 1	2,45	< 20
265	39,1	0,522	16,9	4,37	0,023	23,4	< 1	2,16	< 20
266	40,7	0,500	15,4	4,21	0,018	26,3	< 1	2,13	< 20
268	38,4	0,538	16,0	4,42	0,027	24,8	< 1	2,21	< 20
269	41,3	0,485	15,7	4,28	0,035	25,7	< 1	2,10	< 20
270	37,8	0,418	14,5	4,08	0,028	27,9	< 1	1,86	< 20
271	39,6	0,325	14,6	3,77	0,021	28,9	1,75	1,63	< 20
272	41,0	0,486	16,0	3,95	0,023	26,3	< 1	2,14	< 20
273	39,1	0,498	14,7	4,23	0,022	25,8	< 1	2,08	< 20
274	39,1	0,504	15,3	4,59	0,027	24,6	< 1	2,06	< 20
275	37,8	0,463	14,4	3,96	0,024	27,6	< 1	2,05	60
276	40,2	0,461	16,3	4,14	0,021	26,6	< 1	2,12	< 20
277	37,6	0,548	16,5	4,18	0,031	24,8	< 1	2,49	47
278	42,0	0,503	15,8	4,24	0,020	25,0	< 1	2,33	< 20
279	39,7	0,531	15,9	4,23	0,018	24,3	< 1	2,24	< 20
280	42,3	0,589	15,4	4,19	0,018	24,0	< 1	2,32	< 20

Tabla A6 (continuación)

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% K ₂ O	V (ppm)
281	42,3	0,593	16,8	4,35	0,033	23,2	< 1	2,50	< 20
282	41,7	0,490	15,5	3,84	0,021	25,7	< 1	2,20	< 20
283	38,6	0,372	13,9	3,35	0,012	31,3	< 1	1,69	< 20
284	40,0	0,500	15,1	4,39	0,018	26,7	< 1	2,15	< 20
286	37,0	0,402	15,6	4,51	0,023	27,3	< 1	1,81	< 20
287	39,4	0,424	15,6	4,14	0,024	28,0	< 1	1,89	< 20
288	39,9	0,454	15,0	4,47	0,018	27,0	< 1	1,95	< 20
290	40,2	0,448	15,2	3,85	0,018	27,9	< 1	1,97	30
291	40,1	0,442	15,9	4,50	0,029	27,4	< 1	1,94	51
292	39,4	0,310	13,3	3,16	0,018	30,6	< 1	1,52	21
293	38,6	0,362	14,4	3,66	0,025	28,1	< 1	1,82	< 20
294	39,0	0,324	14,6	3,45	0,021	30,2	< 1	1,69	< 20
295	35,6	0,388	13,6	3,47	0,023	29,9	< 1	1,92	< 20
296	36,4	0,276	14,2	2,86	0,023	33,7	< 1	1,59	< 20
298	34,6	0,251	12,2	3,19	0,014	34,0	< 1	1,45	< 20
299	34,3	0,352	12,3	3,47	0,022	33,1	< 1	1,62	< 20

Tabla A7. Color Munsell de las muestras del pozo 1

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
0,20	10 YR	8	1	White	210	201	189
1,55	10 YR	8	1	White	210	201	189
2,55	10 YR	8	1	White	210	201	189
5,55	10 YR	8	1	White	210	201	189
10,55	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
12,55	10 YR	8	1	White	210	201	189
13,55	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
14,55	2,5 Y	8	6	Yelow	232	199	124
16,55	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
17,20	7,5 YR	8	2	Pinkish White	218	199	181
23,55	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
25,55	7,5 YR	7	8	Reddish Yellow	227	162	91
26,00	7,5 YR	8	2	Pinkish White	218	199	181
27,55	7,5 YR	8	4	Pink	233	196	159
28,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
29,55	10 YR	8	6	Yelow	239	195	130
35,55	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
38,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
44,55	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
47,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
53,55	10 YR	8	2	White	216	200	177
56,55	10 YR	8	2	White	216	200	177
59,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
62,05	10 YR	8	2	White	216	200	177
68,55	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
74,55	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
77,55	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
80,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
83,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
85,55	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
87,00	10 YR	8	2	White	216	200	177
89,00	10 YR	8	2	White	216	200	177

Tabla A8. Color Munsell de las muestras del pozo 3

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
10	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
11	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
12	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
13	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
14	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
15	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
16	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
17	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
18	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
19	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
20	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
21	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
22	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
23	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
24	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
26	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
27	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
28	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
30	2,5 Y	8	6	Yellow	232	199	124
32	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
33	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
34	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
37	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
41	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
42	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
43	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
44	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
45	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
46	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
47	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
48	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
50	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
51	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
53	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
54	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
55	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
56	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
57	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
61	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
62	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
67	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
68	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
70	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
72	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
73	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
74	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150

Tabla A8 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
75	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
76	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
78	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
79	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
81	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
82	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
83	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
85	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
86	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
87	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
88	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
89	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
90	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
91	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
92	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
93	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
94	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
95	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
96	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
97	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
98	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
99	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
100	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
101	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
102	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
103	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
104	2,5 Y	7	2	White	214	201	174

Tabla A9. Color Munsell de las muestras del pozo 6

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
01	10 YR	8	2	White	216	200	177
02	10 YR	8	2	White	216	200	177
03	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
04	10 YR	8	2	White	216	200	177
05	10 YR	8	2	White	216	200	177
06	10 YR	8	2	White	216	200	177
08	10 YR	8	2	White	216	200	177
09	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
010	10 YR	8	2	White	216	200	177
011	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
012	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
013	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
014	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
015	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
016	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
018	10 YR	8	2	White	216	200	177
019	10 YR	8	2	White	216	200	177
020	2,5 y	8	2	White	214	201	174
021	2,5 y	8	2	White	214	201	174
023	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
024	2,5 Y	8	2	White	214	201	174
025	10 YR	8	2	White	216	200	177
026	2,5 YR	8	2	White	214	201	174
027	2,5 YR	8	2	White	214	201	174
028	2,5 YR	8	2	White	214	201	174
029	10 YR	8	2	White	216	200	177
030	10 YR	8	2	White	216	200	177
032	10 YR	8	2	White	216	200	177
033	10 YR	8	2	White	216	200	177
034	10 YR	8	2	White	216	200	177
035	10 YR	8	2	White	216	200	177
036	10 YR	8	2	White	216	200	177
037	10 YR	8	2	White	216	200	177
038	10 YR	8	2	White	216	200	177
039	10 YR	8	2	White	216	200	177
040	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
041	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
042	2,5 Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
043	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
044	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
045	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
046	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
047	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
048	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
049	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
050	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
051	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
052	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
053	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
054	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
055	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
056	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
057	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
058	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
059	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
060	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
061	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
062	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
063	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
064	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
065	10 YR	8	2	White	216	200	177
066	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
067	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
068	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
069	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
070	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
071	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
072	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
073	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
074	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
075	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
077	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
078	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
079	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
080	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
081	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
082	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
083	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
084	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
085	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
086	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
087	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
088	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
089	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
090	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
091	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
092	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
093	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
094	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
095	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
096	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
097	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
098	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
100	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
101	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
102	10 YR	8	2	White	216	200	177
103	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
104	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
105	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
106	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
107	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
108	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
109	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
110	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
111	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
112	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
113	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
114	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
115	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
116	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
117	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
118	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
119	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
120	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
121	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
122	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
123	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
124	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
125	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
126	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
127	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
128	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
129	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
130	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
131	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
132	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
133	10 YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
134	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
135	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
136	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
137	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
138	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
139	10 YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
140	10YR	8	2	White	216	200	177
141	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
142	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
143	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
144	10YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165
145	10YR	8	3	Very Pale Brown	222	199	165

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
147	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
148	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
149	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
150	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
151	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
152	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
153	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
155	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
156	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
157	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
158	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
159	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
160	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
161	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
162	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
163	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
164	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
165	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
166	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
167	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
168	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
169	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
170	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
171	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
172	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
173	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
174	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
175	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
176	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
177	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
178	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
179	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
180	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
181	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
182	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
183	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
184	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
185	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
186	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
187	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
188	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
189	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
190	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
191	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
192	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
193	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
195	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
196	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
197	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
198	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
199	10YR	8	4	Very Pale Brown	228	198	154
200	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
201	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
202	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
203	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
204	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
205	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
206	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
207	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
208	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
209	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
210	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
211	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
212	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
213	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
214	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
215	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
216	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
217	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
218	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
219	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
220	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
221	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
222	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
223	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
224	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
225	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
226	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
227	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
230	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
231	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
232	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
233	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
234	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
235	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
236	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
237	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
238	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
239	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
240	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
241	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
242	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
245	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
246	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
247	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
248	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
249	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
250	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
251	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
252	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
253	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
254	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
255	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
256	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
257	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
258	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
259	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
260	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
261	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
262	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
263	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
264	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
265	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
266	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
268	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
269	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
270	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
271	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
272	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
273	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
274	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
275	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
276	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
277	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
278	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
279	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
280	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
281	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
282	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
283	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
284	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
286	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
287	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
288	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
290	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
291	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
292	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150
293	2.5Y	8	4	Pale Yellow	223	200	150

Tabla A9 (continuación)

Muestra	Hue	Value	Chroma	Color	Red	Green	Blue
295	2.5Y	7	2	Light Gray	187	174	149
296	2.5Y	7	2	Light Gray	187	174	149
298	2.5Y	7	2	Light Gray	187	174	149
299	2.5Y	7	2	Light Gray	187	174	149

APÉNDICE 2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

En este apéndice se discutirán los aspectos teóricos más importantes acerca de las técnicas analíticas utilizadas en el presente Trabajo Especial de Grado.

1. ESPECTROMETRÍA DE RAYOS GAMMA

Los minerales que componen las rocas pueden contener o no elementos radiactivos que los caracterizan. Distintos tipos de rocas, poseen diferentes proporciones de ellos, lo cual permite obtener contrastes en los valores de medición. De esta manera, es posible hacer diferenciaciones y establecer si se trata de cambios litológicos, mineralógicos o aún estructurales. Por lo tanto un efectivo análisis del espectro de rayos gamma de una roca genera valiosa información geológica.

1.1. RADIOACTIVIDAD

Los elementos presentes en la naturaleza están compuestos por átomos. Los átomos están compuestos a su vez por protones, neutrones y electrones. Los protones y neutrones conforman el núcleo del átomo y los electrones giran alrededor de dicho núcleo. Los protones y neutrones permanecen estáticos, tienen masa y tamaño mayores que los electrones, los cuales son más pequeños, livianos y móviles. Cuando los átomos de un elemento presentan el mismo número de protones en el núcleo pero diferente número de neutrones se denominan isótopos.

La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables". Es decir que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que para alcanzar su estado fundamental deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo rayos X), sus nucleones (rayos gamma) o variando el isótopo (al emitir desde el núcleo electrones, positrones, neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo

pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el uranio que con el transcurrir de los siglos acaba convirtiéndose en plomo.

Los elementos naturales radiactivos son aquellos que poseen números atómicos (Z) entre 81 hasta 92, además de otros que se encuentran en la parte central de la tabla periódica (Figura A1).

IA																IIA										IIIA										IVA										VA										VIA										VIIA										VIII A																																																																																																															
1 H 1.0079																4 Be 9.0122										5 B 10.81										6 C 12.011										7 N 14.007										8 O 15.999										9 F 18.998										10 Ne 20.179										2 He 4.0026																																																																																																					
3 Li 6.941																12 Mg 24.305										13 Al 26.982										14 Si 28.086										15 P 30.974										16 S 32.06										17 Cl 35.453										18 Ar 39.948										11 Na 22.990																																																																																																					
19 K 39.098																20 Ca 40.08										21 Sc 44.956										22 Ti 47.90										23 V 50.941										24 Cr 51.996										25 Mn 54.938										26 Fe 55.847										27 Co 58.933										28 Ni 58.71										29 Cu 63.546										30 Zn 65.38										31 Ga 69.72										32 Ge 72.59										33 As 74.922										34 Se 78.96										35 Br 79.904										36 Kr 83.80										20 Ca 40.08	
37 Rb 85.468																38 Sr 87.62										39 Y 88.906										40 Zr 91.22										41 Nb 92.906										42 Mo 95.94										43 Tc (98)										44 Ru 101.07										45 Rh 102.91										46 Pd 106.4										47 Ag 107.87										48 Cd 112.41										49 In 114.82										50 Sn 118.69										51 Sb 121.75										52 Te 127.60										53 I 126.90										54 Xe 131.30										37 Rb 85.468	
55 Cs 132.91																56 Ba 137.33										57 La 138.91										58 Ce 140.12										59 Pr 140.91										60 Nd 144.24										61 Pm (145)										62 Sm 150.4										63 Eu 151.96										64 Gd 157.25										65 Tb 158.93										66 Dy 162.50										67 Ho 164.93										68 Er 167.26										69 Tm 168.93										70 Yb 173.04										55 Cs 132.91																					
87 Fr (223)																88 Ra (226)										89 Ac (227)										90 Th 232.04										91 Pa 231.04										92 U 238.03										93 Np 237.05										94 Pu (244)										95 Am (243)										96 Cm (247)										97 Bk (247)										98 Cf (251)										99 Es (254)										100 Fm (257)										101 Md (258)										102 No (259)										87 Fr (223)																					

Figura A1. Tabla periódica de elementos. Tomado de CAMPOSANO & MARTÍNEZ (2000).

Una sustancia radiactiva emite radiaciones de tres tipos:

1. Radiaciones corpusculares:
 - o Partículas alfa (α): cargadas positivamente, se desvían en un sentido.
 - o Partículas beta (β): cargadas negativamente, se desvían en otro sentido.
2. Radiaciones Electromagnéticas:
 - o Rayos gamma (γ): sin carga, no sufren ninguna desviación.

Las radiaciones alfa (α): son átomos de helio que han perdido sus 2 electrones externos. Están constituidos por 2 protones y 2 neutrones. Su carga es igual a dos cargas elementales positivas y su número de masa es 4. Su velocidad, muy variable, está comprendida entre 14.000 y 25.000 km/s y depende del emisor de la partícula. Así, cada material radiactivo con radiactividad alfa emite esta partícula con una energía y una velocidad característica. Los rayos alfa (α) son muy rápidamente absorbidos por pequeños espesores de materia. El poder de penetración de los rayos alfa (α) es, pues, muy débil, y habrá que tenerlo en cuenta en todas las mediciones que se basan en esta relación. Por otra parte, los rayos alfa (α) son ionizantes, es decir que ellos liberan a su paso a través de los gases, iones formados por los electrones arrancados a los átomos y por los iones positivos residuales. La detección de las partículas alfa (α) por la materia, se debe por la ionización. Se puede determinar, basándose sobre algunas mediciones experimentales, las longitudes de los recorridos de los rayos alfa en un cuerpo de composición química conocida, y esto es, evidentemente, de gran utilidad para la medición de la radiactividad de las rocas.

Las radiaciones beta (β) están formados por electrones, por lo tanto es semejante a la radiación catódica; aunque tienen una energía muy superior a la de los rayos catódicos; su velocidad puede ser muy cercana a la de la luz (300.000 km/s). Su masa es muy pequeña, y más aún, a medida que aumenta la velocidad (masa relativista). Los rayos beta (β) son mucho más penetrantes que los rayos alfa, pueden viajar en el aire hasta varios metros. Su adsorción se debe, como la de los rayos alfa (α), a la ionización.

Las radiaciones gamma (γ) no son desviadas por el campo eléctrico, ni por el magnético y están formadas por ondas electromagnéticas análogas a la de la luz y de los rayos X, pero sus longitudes de onda, muy cortas, son del orden de 1/100 de armstrong. Los rayos gamma (γ) provienen de la energía que se libera al pasar el núcleo de un nivel de excitación a un nivel inferior. Los rayos gamma (γ), son mucho más penetrantes que los rayos alfa (α) y beta (β), no son completamente absorbidos por una placa de aluminio, sino cuando el espesor del de esta alcanza varios centímetros. Por ello, son las usadas comúnmente en la prospección radiométrica. Las radiaciones gamma (γ) poseen energías

discontinuas diferentes, es decir su longitud de onda es variada. La energía de este tipo de radiación se mide en megaelectronvoltios (MeV). Un Mev corresponde a fotones gamma de longitudes de onda inferiores a 10 - 11 m o frecuencias superiores a 1019 Hz.

1.2. SERIES DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Los átomos de estos elementos radioactivos sufren sucesivas transformaciones que forman las llamadas series de desintegración, dentro de las cuales pueden existir hasta 19 elementos.

En el estudio de las series de desintegración se utiliza un valor de gran importancia conocido como período de semidesintegración “T”. El periodo de semidesintegración, es el lapso necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de una sustancia radiactiva. Se toma como referencia la mitad de ellos debido al carácter aleatorio de la desintegración nuclear.

Las series radiactivas producidas en la naturaleza son tres: la serie del uranio, la del torio (Fig. A2) y la del actinio – uranio. El primer elemento de cada una de estas series posee una existencia muy larga, estando su período de semidesintegración entre los 10^8 y 10^{10} años, mientras que el último de ellos es un isótopo estable de plomo. Los isótopos de subíndices B, C, C^I y C^{II} son los principales emisores de rayos gamma (γ) de todas las series radiactivas, razón por la cual fueron escogidos los isótopos ^{214}Bi y ^{208}Tl para ser medidos en el presente Trabajo Especial de Grado. El ^{40}K no forma series radioactivas ya que al desintegrarse pasa a ser un isótopo estable, pero debido a su gran abundancia en la corteza terrestre (2,7 %) brinda un gran aporte a la radioactividad total de las rocas, por lo que también es utilizado en las mediciones de este trabajo (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

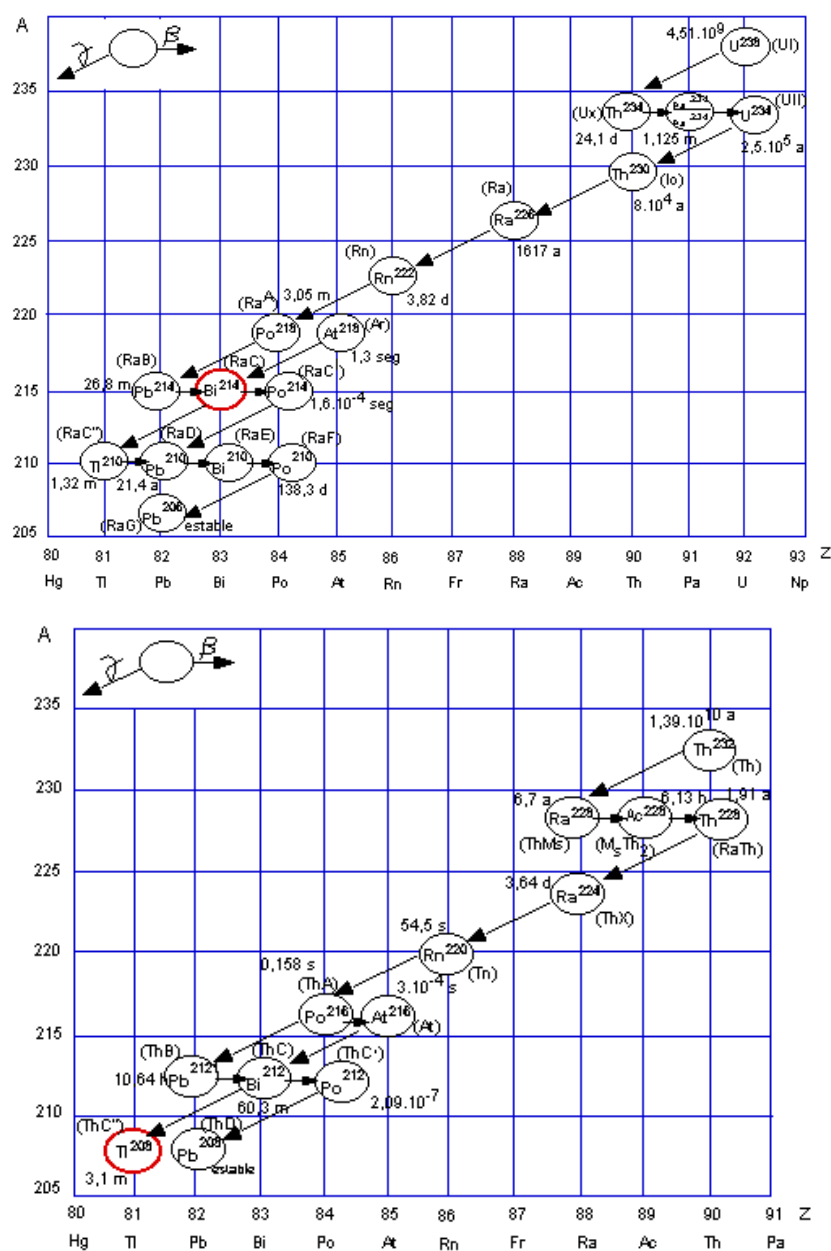


Fig. A2. Series de desintegración del Uranio (arriba) y Thorio (abajo). El eje vertical representa el peso atómico A y el horizontal el número atómico Z. Se muestran también los períodos de semidesintegración en años (a), días (d), horas (h), minutos (m) y segundos (seg). En rojo se muestran los isotopos de interés para el presente trabajo. Tomado de CAMPOSANO & MARTÍNEZ (2000)

En general, en rocas con un contenido normal de elementos radioactivos, cerca del 42 % de la energía radiada se debe al ^{40}K , 32 % al Th, 25 % a las series del U y AcU y el 1 % a los demás elementos radioactivos de la parte central de la tabla de periódica.

1.3. EQUIPOS DE DETECCIÓN EN RADIOMETRÍA

Los equipos más utilizados en radiometría son aquellos que detectan las radiaciones gamma (γ), debido a que las radiaciones α y β rara vez pueden ser detectadas ya que al atravesar la materia y debido a su alto poder de ionización, pierden la casi totalidad de su energía, por lo que unos pocos centímetros de arena son suficiente para detenerlas. Estos equipos pueden medir la intensidad total de radiación sin importar su energía (integrales) o la intensidad de radiación para rangos de energías fijas (espectrómetros). Actualmente los contadores más comúnmente usados son los de **centelleo o escintilómetros**.

Los contadores de centelleo se basan en la propiedad de ciertos cristales que emiten destellos (radiaciones luminosas) al absorber rayos gamma (γ). Consta de un centelleador y un fotomultiplicador (Fig. A3).

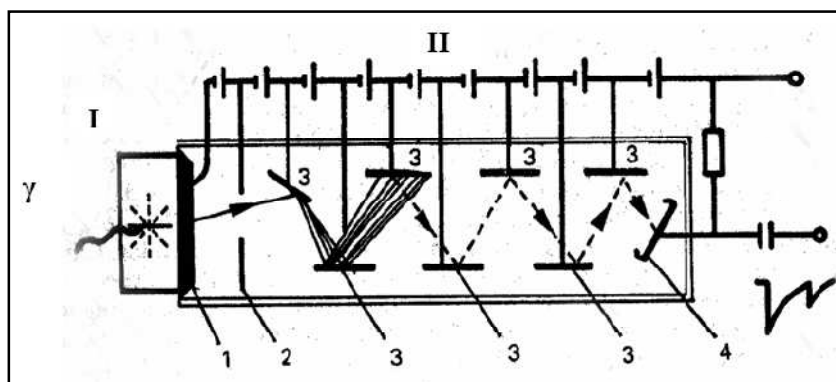


Figura A3. **Escintilómetro**, I= centelleador, II= fotomultiplicador, 1= fotocátodo, 2= electrodo de enfoque, 3= electrodos, 4= ánodo del fotomultiplicador. Tomado de CAMPOSANO & MARTÍNEZ (2000).

En el centelleador las partículas radioactivas cargadas, al pasar a través de la materia pierden parte de su energía cinética al ionizarse o excitar los átomos y las moléculas de éstas. La energía perdida es transformada primeramente en energía de movimiento térmico y posteriormente en cuantos de luz con longitudes de onda características para la sustancia dada. Sólo en algunas sustancias (centelleadoras) los fotones de luz pueden salir de la misma y centellear.

Entre el centelleador y el fotomultiplicador existe un fotocátodo el cual permite que los fotones de luz que provienen del centelleador sean transformados en electrones por medio de un efecto fotoeléctrico que se da lugar en el mismo (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

Los tubos fotomultiplicadores permiten detectar los destellos a través de artificios especiales. Este es un tubo de vidrio al vacío dentro del cual se encuentran electrodos. Los electrones provenientes del fotocátodo inciden en cada uno de los electrodos permitiendo la aparición de electrones secundarios, multiplicando así la cantidad de electrones recibidos de una manera proporcional. Lo importante de este proceso es que gracias a sus características, la amplitud del impulso eléctrico que sale del contador es proporcional a la energía que se transmite al centelleador por la radiación, lo que permite medir la radiación (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

En general a partir de los contadores de radiación se puede obtener: cantidad de sustancias radioactivas, concentración e intensidad de las mismas (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

Espectrometría de rayos gamma.

Los espectros energéticos son los rangos de energía que presentan los distintos tipos de radiaciones. Debido a que cada tipo de radiación posee espectros distintos y característicos es posible diferenciar un tipo de radiación de otra. Los espectros energéticos también permiten determinar los elementos emisores, ya que cada uno de estos emite radiaciones (α , β , y γ) con energías específicas (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

La espectrometría se basa en las mediciones de la energía de las partículas cargadas y los cuantos gamma (γ), método que nos permite determinar la presencia de los elementos radiactivos más importantes por las diferencias existentes entre los espectros energéticos de la radiación emitida por cada uno de ellos. Cada uno de estos elementos posee una ventana de valores característicos de energía de los cuantos γ lo que permite identificar la presencia de un elemento dado a partir de la emisión de cuantos γ con energías similares.

Los espectrómetros de rayos gamma, se emplean normalmente para transformar la radiación en señales eléctricas. La radiación ionizante puede medirse a través del efecto físico o químico de ésta sobre la materia. La eficiencia de un detector, entonces, depende de la probabilidad de que un fotón incidente pueda ser absorbido por el detector. Normalmente se mide por la relación de las cuentas registradas a los fotones incidentes. La resolución del detector se mide por la capacidad de éste para diferenciar dos rayos gamma de energías ligeramente diferentes.

La determinación de estas radiaciones gamma emitidas por los isótopos radiactivos tiene diversas aplicaciones dentro de las geociencias entre las cuales podemos mencionar:

1. Prospección y búsqueda de yacimientos de minerales radiactivos.
2. Herramienta auxiliar en el cartografiado de unidades estratigráficas.
3. Prospección de minerales no radiactivos que estén íntimamente asociados con minerales radiactivos.
4. Determinación litológica indirecta en pozos para petróleo y agua.
5. Identificación de superficies de inundación, discordancias, hiatos, horizontes guías y como una herramienta de identificación preliminar de ambientes sedimentarios en el subsuelo a través de registros continuos de rayos gamma (SERRANO 2003).

2. FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La fluorescencia de rayos X (FRX) es comúnmente la técnica analítica más usada en la determinación de elementos químicos mayoritarios y traza en muestras de rocas. Es una técnica sumamente versátil y puede analizar cerca de 80 elementos en un amplio rango de sensibilidad, detectando concentraciones en porcentaje y partes por millón. A continuación se comentaran los basamentos teóricos del método.

2.1. LOS RAYOS X

Los rayos X son una radiación electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos gamma. La diferencia fundamental con los rayos gamma es su origen: los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desexcitación de un nucleón de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones.

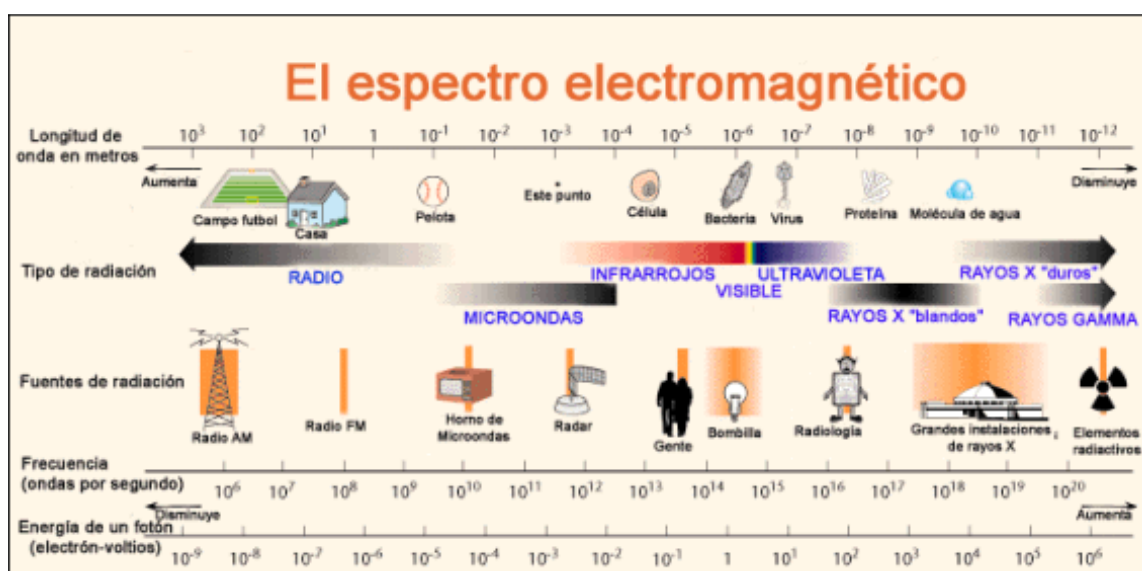


Figura A4. El espectro electromagnético.

La energía de los rayos X en general se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma producidos naturalmente. La longitud de onda de los rayos X está entre 10 a 0,1 nanómetros (Ver Figura A4), correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 3.000 PHz (de 50 a 5.000 veces la frecuencia de la luz visible) de ahí que el poder de penetración de los rayos X les permita interactuar no sólo con la materia sino también con los átomos de la misma.

Los rayos X se pueden generar por bombardeo de un blanco metálico, por un haz de electrones de alta energía, por la exposición de una sustancia a un haz primario de rayos X,

para generar un haz secundario de rayos fluorescentes, y por el empleo de una fuente radioactiva de rayos γ , la cual al interaccionar con los elementos de la muestra permite la emisión de rayos X.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica para cada elemento químico (Ver Figura A5). Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis FRX es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía.

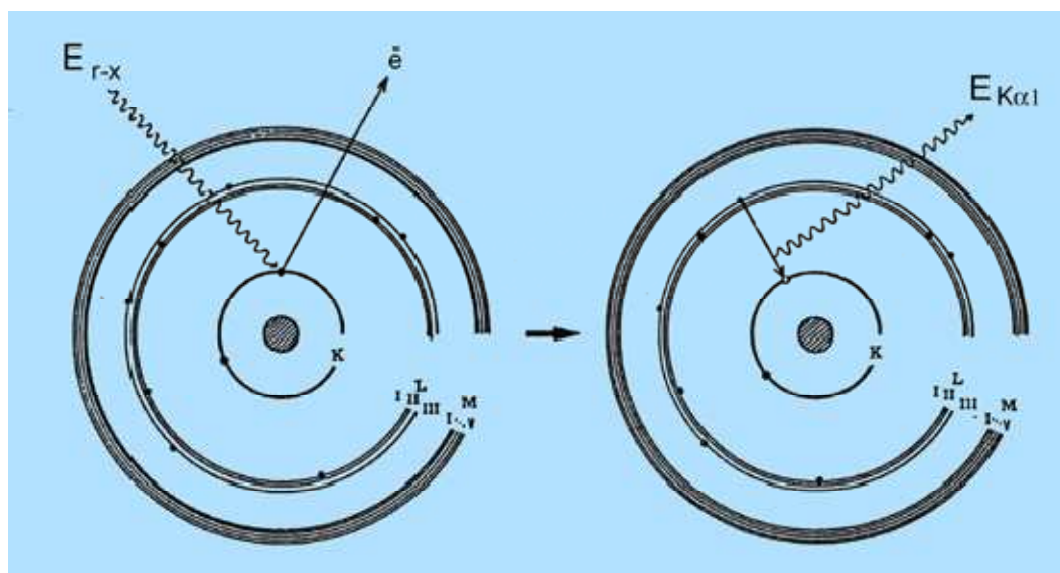


Figura A5. Derecha radiación x primaria, izquierda radiación x secundaria o fluorescencia.

Los espectros muestran los resultados en forma de información cualitativa, donde los elementos en una muestra han sido detectados mediante el reconocimiento de los rangos de

energía emitidos. La conversión de las intensidades mostradas por cada elemento, a alguna medida de concentración, es la base de los análisis cuantitativos para los que son necesarios la calibración o comparación de las intensidades de las muestras a ser analizadas, con intensidades de muestras patrones o estándar, siendo necesario que ambos tipos muestren composición química y física similar (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

2.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Los equipos que aplican estas técnicas constan básicamente de los siguientes componentes: una fuente, un dispositivo para restringir el intervalo de energía/longitud de onda utilizado, un portamuestras, un detector de radiación o transductor y un procesador de señales o dispositivo de lectura. Existen tres tipos de instrumentos de fluorescencia de rayos X: dispersores de longitud de onda, dispersores de energía y no dispersores. Para efectos de este trabajo se hará referencia sólo a los instrumentos dispersores de energía (GONZÁLEZ & SÁNCHEZ 2001).

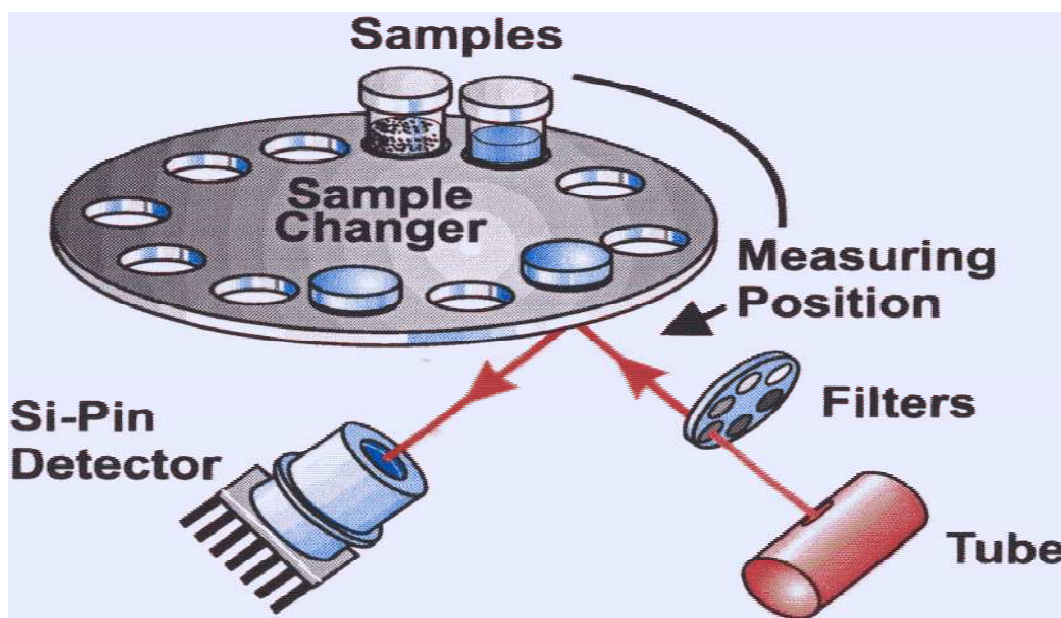


Figura A6. Componentes principales de un instrumento de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía. Tomado de GONZÁLEZ & SÁNCHEZ (2001).

Como se muestra en la figura A6, un equipo de dispersión de energía consiste en una fuente policromática que puede ser un tubo de Coolidge o un material radiactivo, un

portamuestras, un detector semiconductor de Si desplazado por Li y varios componentes electrónicos necesarios para la discriminación energética. El tubo de Coolidge es un tubo de alto vacío con un cátodo de filamento de W y un ánodo masivo de W, Cu, Mo, Cr, Ag, Ni, Co, Rh, o Fe, empleando circuitos eléctricos se calienta el cátodo y se aceleran los electrones hacia el ánodo en el cual se genera un espectro continuo de rayos X (GONZÁLEZ & SÁNCHEZ 2001).

El detector semiconductor de Si desplazado por Li, transforma la energía radiante en energía eléctrica, y un par de amplificadores se encargan de hacer de la señal una herramienta de fácil detección (GONZÁLEZ & SÁNCHEZ 2001).

2.3. POSIBILIDADES DEL MÉTODO:

- **Campo de aplicación.** Es aplicable a cualquier elemento químico con número atómico mayor de 4 (berilio), aunque en los espectrómetros comerciales normalmente utilizados la zona de aplicación está limitada hasta el número atómico 9 (flúor).
- **Espectro de rayos X.** Muchas de las ventajas de esta técnica se derivan de la relativa simplicidad del espectro de emisión de rayos X. En general, cada elemento tiene unas pocas líneas (serie K: 2-3, L: 8-12, M: 2-6), muchas de las cuales son de intensidad muy baja, y además cada serie aparece en zonas de longitud de onda muy diferentes y localizadas. La posición de las líneas no depende del tipo de compuesto en el que se encuentre el elemento (si exceptuamos los 6-8 elementos de menor número atómico), ni por su estado físico.
- **Interferencias espectrales entre líneas.** Debido a la simplicidad del espectro de rayos X, las interferencias espectrales (a no ser que exista un número muy elevado de elementos, 30-40), son relativamente infrecuentes; en el caso de que existan, hay muchas formas de evitarlas o corregirlas.
- **Efectos de absorción y refuerzo.** Los elementos que se encuentran en la muestra junto al que se desea determinar, pueden originar efectos de absorción y de refuerzo de las líneas analíticas (efectos de matriz). Estos efectos de matriz son los que más problemas

causan a la hora de determinar la concentración de un elemento, existiendo distintos métodos de evitarlos y corregirlos, ya que son sistemáticos, previsibles y evaluables.

- **Método no destructivo.** Es un método de destructivo en el sentido en que la muestra no sufre daños durante el análisis. Las muestras analizadas pueden volver a analizarse las veces que se desee sin que sufran daños (muestras patrones, piedras preciosas, pruebas judiciales, objetos de arte, antigüedades, etc.). Existen ciertas limitación a este carácter no destructivo, ya que ciertos materiales pueden deteriorarse cuando están sometidos durante largos periodos a una intensa radiación con rayos X. Así, determinados minerales, vidrios, cerámicas y otros materiales inorgánicos pueden llegar a adquirir un color, normalmente pasajero, distinto del original.

- **Variedad de muestras.** Existen pocos métodos analíticos que permitan tal variedad de formas y tipos de muestras como la fluorescencia de rayos X. Las muestras pueden estar en forma de sólidos, pastillas, polvos, líquidos, películas finas e incluso gases. El material puede ser metal, mineral, cerámico, vidrio, plástico, tela, papel, o prácticamente cualquier tipo. La forma y el tamaño pueden ser muy variables. El método puede ser aplicado en condiciones especiales como altas y bajas temperaturas, atmósferas especiales, etc.

- **Rango de concentraciones.** Es aplicable en un rango extremadamente amplio de concentración y desde el 100% al 0,0001%, en los casos más favorables. Es suficiente la construcción de una única recta de calibración para todo el intervalo de concentraciones sin necesidad de dividirlo en zonas.

- **Sensibilidad.** No se puede dar una norma general pues varía según el elemento y el tipo de muestra. En general, es mayor cuanto mayor es el número atómico del elemento a analizar y menores los números atómicos de los elementos que forman la matriz.

Por otra parte, entre las desventajas y limitaciones del método tenemos:

- Necesidad de patrones.
- Problemática de los elementos ligeros (menor de 14, Si). Absorción, baja sensibilidad.
- Baja resolución para longitudes de onda mayores a 1Å.

3. COLOR MUNSELL

El color del suelo o de una roca es una de las características morfológicas más importantes, es la más obvia y fácil de determinar, permite identificar distintas clases de suelos, es el atributo más relevante utilizado en la separación de horizontes y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos de este recurso. No obstante, el color del suelo en sí mismo es de poca relevancia, su verdadera importancia radica en que el suelo tiene un conjunto de atributos que de alguna forma se relacionan con el color, siendo este diferente entre horizontes y entre distintas clases de suelos. En consecuencia, cualquier error en su determinación acarrea conclusiones equivocadas respecto a las características que se relacionan con él.

El sistema de clasificación de colores de Munsell describe todos los posibles colores en términos de tres coordenadas: matiz (Hue) que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; claridad (Value), el cual indica la luminosidad o oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro; y pureza (Chroma), que indica el grado de saturación del gris neutro por el color del espectro.

Este es el sistema utilizado en los estudios de suelos para la determinación del color; para ello se emplea la tabla de colores Munsell. Estas tablas incluyen todos los matices del rango visible del espectro electromagnético, se utilizan para describir el color de rocas, suelos, plantas, entre otros. En suelos se utiliza sólo alrededor de la quinta parte del rango total de matices.

La tabla Munsell está compuesta de hojas, representando cada una de ellas un matiz (Hue) específico que aparece en la parte superior derecha de dicha página. Cada hoja presenta unas series de plaquitas diferentemente coloreadas y sistemáticamente arregladas en la hoja, que representan la claridad (Value) y la pureza (Chroma). Las divisiones de claridad (Value) se presentan en sentido vertical, incrementando su valor (haciéndose más claro) de abajo hacia arriba; las divisiones de pureza (Chroma) se presentan en sentido

horizontal, en la parte inferior de la hoja, incrementándose de izquierda a derecha (Figura A7).

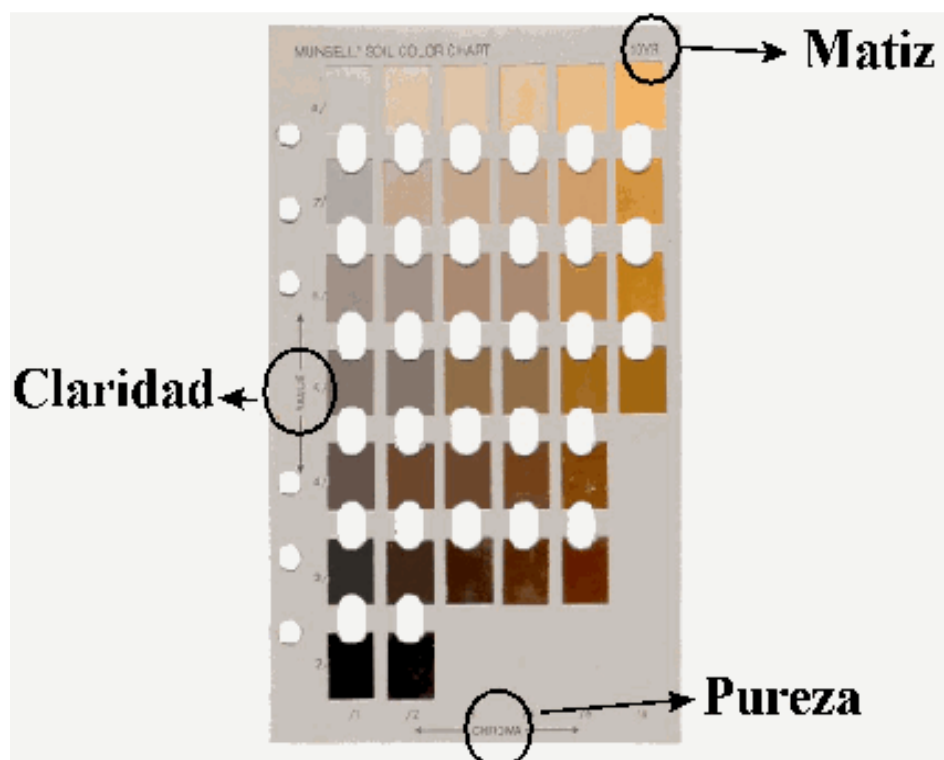


Figura A7. Hoja de Colores de Munsell.

El color del suelo puede ser utilizado como una clave del contenido de ciertos minerales en el suelo, basado en que los minerales férricos proveen la mayoría y la mayor variedad de pigmentos al suelo. En la tabla A10 se muestran los colores asociados con los componentes minerales y orgánicos del suelo. Sin embargo es de hacer notar que esta información es de referencia ya que otros factores pueden influir sobre el color de suelo.

Tabla A10. Colores asociados con los componentes minerales y orgánicos del suelo. Esta información es de referencia ya que otros factores pueden influir sobre el color de suelo. Tomado de OVALLES (2003).

Componente	Formula	Munsell	Color
goethita	FeOOH	10YR 8/6	Amarillo
goethita	FeOOH	7.5YR 5/6	Marrón fuerte
hematita	Fe ₂ O ₃	5R 3/6	Rojo
hematita	Fe ₂ O ₃	10R 4/8	Rojo
lepidocrocita	FeOOH	5YR 6/8	Amarillo rojizo
lepidocrocita	FeOOH	2.5YR 4/6	Rojo
ferrihidrita	Fe (OH) ₃	2.5YR 3/6	Rojo oscuro
glauconita	K(Si _x Al _{4-x})(Al,Fe,Mg)O ₁₀ (OH) ₂	5Y 5/1	Gris oscuro
maghernita	-Fe ₂ O ₃	2.5YR-5YR	Rojo
sulfuro de hierro	FeS	10YR 2/1	Negro
pirita	FeS ₂	10YR 2/1	Negro (metálico)
jaroisita	K Fe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	5Y 6/4	Amarillo pálido
humus		10YR 2/1	Negro
calcita	CaCO ₃	10YR 8/2	Blanco
dolomita	CaMg (CO ₃) ₂	10YR 8/2	Blanco
yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	10YR 8/3	Marrón muy pálido
cuarzo	SiO ₂	10YR 6/1	Gris claro

Dentro de la gama de colores que presentan los suelos podemos mencionar las siguientes:

- **Color negro:** se asocia a la incorporación de materia orgánica que se descompone en humus que da la coloración negra al suelo. Este color ha sido asociado con niveles altos de materia orgánica en el suelo, condiciones de buena fertilidad, en especial presencia de cationes tales como el Ca²⁺ y Mg²⁺ y K⁺; colateralmente tiene asociado otras condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica; en otras oportunidades, cuando hay acumulación de Na⁺, por ser este un agente dispersante, el suelo, aún con muy bajos niveles de materia orgánica, adquiere la coloración negra, pero tiene como condición asociada una muy mala condición estructural. En resumen, este color por lo general está asociado a la presencia de: carbonatos de Ca²⁺ o Mg²⁺ más materia orgánica altamente descompuesta. Además de otros cationes (Na⁺, K⁺) más materia orgánica altamente descompuesta.

- **Color rojo:** se asocia a procesos de alteración de los materiales parentales bajo condiciones de alta temperatura, baja actividad del agua, rápida incorporación de materia orgánica, alta liberación de Fe de las rocas; es indicativo de condiciones de alta meteorización, se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación. En términos generales se asocia con la presencia de Óxidos de Fe^{3+} (Hematita)

- **Color amarillo a marrón amarillento claro:** por lo general es indicativo de meteorización bajo ambientes aeróbicos (oxidación), ocurre como en el caso de la goethita, donde cristales grandes de este mineral confieren una pigmentación amarilla al suelo, mientras de cristales pequeños de este mineral confieren tonalidades de color marrón; más frecuentemente estos colores asociados a la goethita ocurren en climas templados. Se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo. En general se asocia con la presencia de Óxidos hidratados de Fe^{3+} .

- **Color marrón:** este color está muy asociado a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo; se relaciona con condiciones de niveles medios a bajos de materia orgánica y un rango muy variable de fertilidad. En general se asocia con la ocurrencia de materia orgánica ácida parcialmente descompuesta, además de combinaciones de óxidos de Fe más materiales orgánicos.

- **Color blanco o ausencia de color:** se debe fundamentalmente a la acumulación de ciertos minerales o elementos que tienen coloración blanca, como es el caso de calcita, dolomita y yeso, así como algunos silicatos y sales. En otras ocasiones, es consecuencia de la remoción de componentes del suelo por diversos procesos, en cuyo caso el suelo adquiere el color de los elementos remanentes. En general se asocia con la presencia de óxidos de Al y silicatos (caolinita, gibsitita, bauxita), sílice (SiO_2), tierras alcalinas (CaCO_3 , MgCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sales altamente solubles (cloruros, nitratos de Na^+ y K^+)

- **Color gris:** puede ser indicativo del ambiente anaeróbico. Este ambiente ocurre cuando el suelo se satura con agua, siendo desplazado o agotado el oxígeno del espacio poroso del suelo (OVALLES 2003).

Es importante señalar que el color Munsell (valores de HUE, VALUE y CHROMA) puede ser transformado a valores numéricos correspondientes a los colores rojo (Red),

verde (Green) y azul (Blue), denominados en conjunto RGB, esto se realiza utilizando el programa *Babel Color & Analyzer (CT & A)*. Esta transformación se realiza con la finalidad de poder manejar de forma numérica los colores Munsell, para poder generar perfiles de distribución de color.

A continuación se presentan las tablas de correspondencia (tabla A11) entre colores Munsell y valores de RGB.

Tabla A11. Tabla de correspondencia entre colores Munsell y valores de RGB.

Hue	Value	Chroma	Red	Green	Blue
10R	6	1	159	146	143
10R	6	2	167	144	138
10R	6	3	175	141	131
10R	6	4	184	139	125
10R	6	6	198	133	112
10R	6	8	212	127	99
10R	5	1	132	120	118
10R	5	2	141	118	112
10R	5	3	148	115	106
10R	5	4	157	112	100
10R	5	6	171	106	87
10R	5	8	184	99	73
10R	4	1	108	94	92
10R	4	2	116	92	86
10R	4	3	123	89	80
10R	4	4	132	86	74
10R	4	6	144	80	63
10R	4	8	155	73	50
10R	3	1	83	69	67
10R	3	2	91	67	62
10R	3	3	97	63	57
10R	3	4	105	60	52
10R	3	6	117	54	41
2.5YR	6	0	154	150	150
2.5YR	6	2	167	144	134
2.5YR	6	4	183	140	120
2.5YR	6	6	197	134	104
2.5YR	6	8	209	129	88
2.5YR	5	0	129	124	126
2.5YR	5	2	141	118	109
2.5YR	5	4	156	113	95

Tabla A11 (continuación)

Hue	Value	Chroma	Red	Green	Blue
2.5YR	5	6	169	108	79
2.5YR	5	8	181	102	62
2.5YR	4	0	105	98	98
2.5YR	4	2	116	92	83
2.5YR	4	4	130	87	69
2.5YR	4	6	142	82	55
2.5YR	4	8	152	76	39
2.5YR	3	0	80	73	72
2.5YR	3	2	91	67	59
2.5YR	3	4	103	62	47
2.5YR	3	6	114	56	33
5YR	8	1	211	200	193
5YR	8	2	219	198	184
5YR	8	3	228	196	174
5YR	8	4	236	194	164
5YR	7	1	185	173	167
5YR	7	2	193	171	158
5YR	7	3	200	169	149
5YR	7	4	208	167	140
5YR	7	6	222	163	120
5YR	7	8	233	159	101
5YR	6	1	158	147	140
5YR	6	2	167	145	132
5YR	6	3	173	144	126
5YR	6	4	181	141	114
5YR	6	6	194	137	95
5YR	6	8	205	132	76
5YR	5	1	132	121	115
5YR	5	2	140	119	106
5YR	5	3	146	117	97
5YR	5	4	154	115	89
5YR	5	6	166	110	70
5YR	5	8	176	106	50
5YR	4	1	107	95	89
5YR	4	2	115	93	80
5YR	4	3	121	91	72
5YR	4	4	128	88	64
5YR	4	6	138	84	47
5YR	3	1	82	70	65
5YR	3	2	89	68	57
5YR	3	3	95	66	50
5YR	3	4	101	64	43

Tabla A11 (continuación)

Hue	Value	Chroma	Red	Green	Blue
7.5YR	8	2	218	199	181
7.5YR	8	4	233	196	159
7.5YR	8	6	245	192	138
7.5YR	7	0	182	176	177
7.5YR	7	2	192	172	155
7.5YR	7	4	206	169	135
7.5YR	7	6	217	165	113
7.5YR	7	8	227	162	91
7.5YR	6	0	156	149	151
7.5YR	6	2	166	146	129
7.5YR	6	4	179	142	110
7.5YR	6	6	190	139	89
7.5YR	6	8	199	136	66
7.5YR	5	0	130	123	126
7.5YR	5	2	139	119	104
7.5YR	5	4	152	116	85
7.5YR	5	6	163	112	63
7.5YR	5	8	171	109	42
7.5YR	4	0	105	96	97
7.5YR	4	2	114	93	78
7.5YR	4	4	126	90	59
7.5YR	4	6	134	87	40
7.5YR	3	0	78	73	72
7.5YR	3	2	88	69	55
7.5YR	3	4	98	65	38
10YR	8	1	210	201	189
10YR	8	2	216	200	177
10YR	8	3	222	199	165
10YR	8	4	228	198	154
10YR	8	6	239	195	130
10YR	8	8	248	193	105
10YR	7	1	183	174	163
10YR	7	2	190	173	152
10YR	7	3	195	172	140
10YR	7	4	201	171	129
10YR	7	6	211	169	105
10YR	7	8	220	166	81
10YR	6	1	156	148	137
10YR	6	2	163	147	126
10YR	6	3	168	146	115
10YR	6	4	174	144	105
10YR	6	6	184	142	81

Tabla A11 (continuación)

Hue	Value	Chroma	Red	Green	Blue
10YR	5	1	130	122	112
10YR	5	2	137	120	102
10YR	5	3	141	119	90
10YR	5	4	148	118	80
10YR	5	6	157	115	56
10YR	5	8	163	113	28
10YR	4	1	105	96	87
10YR	4	2	111	95	76
10YR	4	3	116	94	65
10YR	4	4	122	92	55
10YR	4	6	129	90	33
10YR	3	1	79	71	63
10YR	3	2	85	70	54
10YR	3	3	89	69	43
10YR	3	4	94	67	35
10YR	3	6	100	65	9
10YR	2	1	56	48	42
10YR	2	2	61	47	33
2.5Y	8	0	206	203	200
2.5Y	8	2	214	201	174
2.5Y	8	4	223	200	150
2.5Y	8	6	232	199	124
2.5Y	8	8	239	197	98
2.5Y	7	0	180	176	175
2.5Y	7	2	187	174	149
2.5Y	7	4	197	173	125
2.5Y	7	6	205	171	100
2.5Y	7	8	212	170	73
2.5Y	6	0	153	150	152
2.5Y	6	2	160	148	124
2.5Y	6	4	169	146	101
2.5Y	6	6	178	145	74
2.5Y	6	8	184	143	45
2.5Y	5	0	126	123	126
2.5Y	5	2	134	121	100
2.5Y	5	4	143	120	76
2.5Y	5	6	151	118	49
2.5Y	4	0	99	98	97
2.5Y	4	2	108	96	74
2.5Y	4	4	117	94	51
5Y	8	1	207	202	187
5Y	8	2	211	202	173

Tabla A11 (continuación)

Hue	Value	Chroma	Red	Green	Blue
5Y	8	4	217	202	147
5Y	8	6	223	202	120
5Y	8	8	228	201	91
5Y	7	1	180	175	162
5Y	7	2	184	175	148
5Y	7	3	187	175	135
5Y	7	4	190	175	122
5Y	7	6	196	175	95
5Y	7	8	202	174	66
5Y	6	1	153	149	136
5Y	6	2	157	149	123
5Y	6	3	160	149	110
5Y	6	4	164	149	98
5Y	6	6	170	148	70
5Y	6	8	175	147	36
5Y	5	1	127	123	111
5Y	5	2	131	123	98
5Y	5	3	134	122	85
5Y	5	4	138	122	73
5Y	5	6	144	121	44
5Y	4	1	102	97	85
5Y	4	2	105	97	73
5Y	4	3	109	96	61
5Y	4	4	112	96	49
5Y	3	1	77	72	62
5Y	3	2	80	72	52
5Y	2	1	53	49	41
5Y	2	2	56	49	32

4. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La Geoquímica está relacionada con las leyes que gobiernan la distribución de los elementos químicos en la Tierra. Es la ciencia que estudia en forma cualitativa y cuantitativa las geósferas internas (núcleo, manto) y externas (litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera) que forman la Tierra, y las leyes que controlan la distribución de los elementos químicos y sus isótopos en cada una de estas partes y entre ellas. Cada tipo de roca, desde distintos puntos de vista, se puede considerar como un sistema químico en el cual distintos agentes pueden producir cambios químicos. Estos cambios implican una perturbación del equilibrio, con ulterior formación de un nuevo sistema, el cual, bajo nuevas condiciones, a su vez llega a ser estable. El estudio de la geoquímica puede tener una gran cantidad de propósitos, razón por lo cual esta Ciencia se ha dividido a través de los años en una serie de subáreas entre las que se pueden mencionar a la geoquímica inorgánica, orgánica, isotópica, prospectiva y de la contaminación entre otras.

La geoquímica de rocas sedimentarias, por su parte comprende el estudio de la distribución y abundancia de elementos químicos en estas rocas, y su relación con los diversos procesos que interviene en su formación.

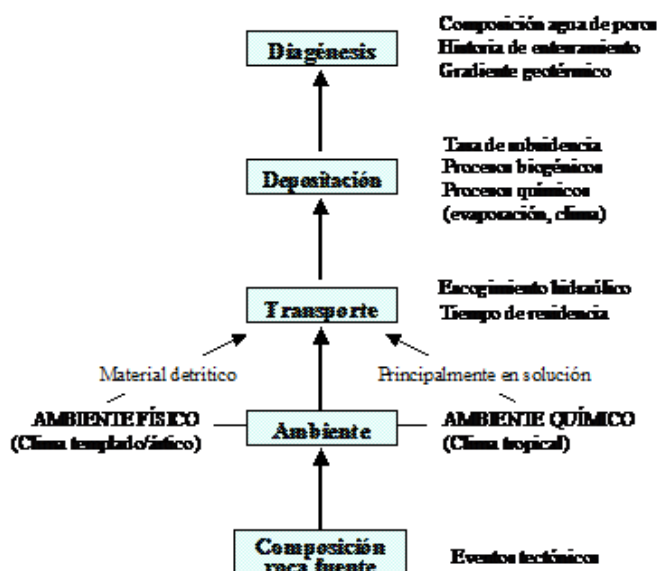


Figura A8. Procesos que intervienen en la formación de una roca sedimentaria. Tomado de ROLLINSON (1997).

Entre los principales parámetros o factores que controlan la distribución de los elementos químicos en éstas, se encuentran: composición de la roca fuente, procesos tectónicos y condiciones climáticas o ambiente de depositación así como procesos diagenéticos. Sin embargo la composición química original de una roca sedimentaria es modificada sustancialmente por varios procesos, como lo es la descomposición química de algunos minerales silicatados y la formación de otros, principalmente durante la meteorización, transporte y la diagénesis, como lo es la alteración de minerales inestables (feldespatos, arcillas detríticas y fragmentos líticos), así como también la disolución del cuarzo y formación de minerales autigénicos. Debido a esto, además de considerarse a la composición mineralógica de mayor utilidad para la interpretación de proveniencia de sedimentos e historia depositacional, se ha tenido poco énfasis en el estudio de la composición química de rocas sedimentarias silisiclásticas.

Convencionalmente los estudios estratigráficos y correlativos han estado basados principalmente en caracterizaciones litológicas, paleontológicas, paleomagnéticas y paleoambientales. El conocimiento de que las heterogeneidades geoquímicas pueden ser usadas para obtener información acerca de procesos geológicos no es nuevo, pero los altos costos y la lenta obtención de datos multielementales de alta calidad, habían tenido limitados este tipo de estudios.

A partir de los años 80 avances significativos en la geoquímica analítica, permitieron por primera vez la adquisición rápida y a menor costo de un conjunto de datos de alta calidad, lo que ha resultado en un cambio de actitud respecto al significado de la composición química y desarrollándose un profundo interés en la geoquímica de rocas sedimentarias. Estos avances analíticos impulsaron el desarrollo de la geoquímica como una herramienta poderosa de caracterización y correlación de estratos a partir del uso de datos inorgánicos y en base a variaciones geoquímicas en la secuencia estratigráfica. Esto último es conocido actualmente como quimioestratigrafía y permite dividir una secuencia estratigráfica en distintas unidades con comportamientos geoquímicos diagnósticos, denominadas quimiofacies.

Algunas de estas herramientas desarrolladas para este tipo de análisis permiten la obtención de los siguientes datos geoquímicos:

- **Componentes mayoritarios:** son los componentes predominantes en la roca. Estos son expresados como óxidos, a saber SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5 . La determinación de los componentes mayoritarios es usualmente hecha solo para cationes, asumiendo que estos van acompañados por las cantidades apropiadas de oxígeno. Los elementos pueden ser mayoritarios o trazas dependiendo el tipo de roca que se estudie. BATHIA (1983) establece que la geoquímica de los componentes mayoritarios en areniscas, puede ser utilizada para inferir el tipo de fuente y el marco tectónico de cuencas sedimentarias antiguas. La relación entre las características atribuibles a placas tectónicas (enterramiento, interacción de placas, gradientes de presión y geotérmicos) y variables tales como fuentes de sedimentos, relieve, selección y diagénesis; gobiernan la composición de las rocas clásticas.

- **Elementos traza:** son los elementos menos abundantes en la roca y sus concentraciones se expresan en ppm o ppb y son $< 0,1\%$. BATHIA (1983) en su trabajo de los elementos traza, encontró que la geoquímica de estos elementos reflejan las condiciones físico – químicas en que estos sedimentos se formaron. Esto se aplica de manera más especial cuando se trata de aquellos elementos relativamente inmóviles.

- **Isótopos radiactivos:** incluyen aquellos elementos o isótopos cuyo decaimiento espontáneo se debe a su radiactividad natural, que en el caso particular de U y Th se produce una serie de cambios que generan otro grupo de elementos químicos.

Para una mejor comprensión y análisis de la respuesta geoquímica de las rocas es necesario tratar los datos geoquímicos por medio de gráficos exploratorios y de diversas técnicas estadísticas, univariadas y multivariadas. Uno de los beneficios estadísticos más importantes es la obtención de perfiles, los cuales permiten visualizar de mejor manera el comportamiento de una sección en cuanto a composición de elementos mayoritarios y elementos traza, relaciones entre elementos, y/o concentraciones de isótopos radiactivos (Figura A9), facilitando a su vez la definición de unidades o *quimiofacies* con

características químicas y radiométricas específicas, la comparación entre perfiles de distintas secciones y el establecimiento de posibles correlaciones (CHACIN 2000).

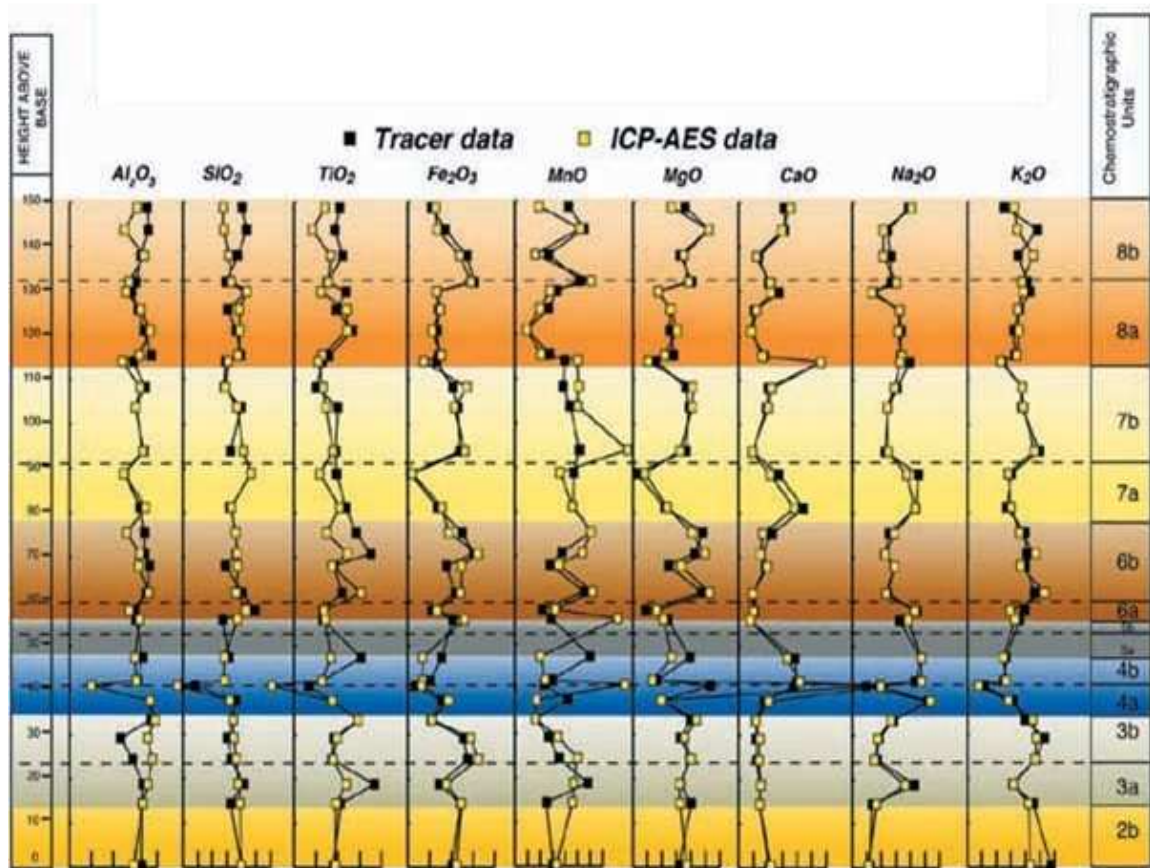


Figura A9. Perfiles generados a partir de la composición de nueve elementos, en donde se puede apreciar las respectivas unidades químicas en que se ha subdividido la secuencia perteneciente a la Formación Green River en Wyoming (USA). Tomado de ROSENWASSER et al. (2000).

Los eventos geoquímicos que definen el patrón de los perfiles, pueden reflejarse como máximos, mínimos y deflexiones de las curvas, los cuales a su vez definen los marcadores geoquímicos de primer y segundo orden. Los marcadores de primer orden representan eventos geoquímicos caracterizados por más de un elemento o por una deflexión excepcional de las curvas. Los marcadores de segundo orden se definen a partir de un solo elemento o por fluctuaciones elementales menos significativas (JORGENSEN 1986). Entonces se define quimiofacies como inflexiones importantes y comunes en varios perfiles

que pueden estar indicando el límite entre dos quimiofacies a las cuales debe dárseles una correcta interpretación.

La composición química de las rocas sedimentarias es excesivamente variable, tanto como la composición química de las rocas ígneas. Considerando la composición en términos de óxidos, se ha encontrado que el SiO_2 puede exceder al 99% en algunas areniscas, el Al_2O_3 puede llegar muy cerca del 70% en la bauxita, el Fe_2O_3 hasta el 75% en la limonita, el FeO puede alcanzar valores tan altos como 60% en la siderita, el MgO a 20% en la dolomita y CaO hasta 56% en las calizas puras. En vista de tales variaciones, la determinación de una composición química promedio de rocas sedimentarias, no es simple y a través del tiempo ha existido mucho interés en caracterizar las rocas sedimentarias de acuerdo a su composición química (ARREAZA 2003).

Estudios recientes (BOGGS 2001) han realizado la estimación de la composición química promedio de las rocas sedimentarias individualmente, de este modo se tiene la caracterización química de areniscas, tal como puede verse en la Tabla A12.

Tabla A12. Promedio de la composición química: componentes mayoritarios (%) y elementos traza (ppm) de algunas areniscas de formaciones de Norte América. Adaptado de BOGGS (2001)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
n=	11	23	30	16	18	12	119	12
SiO₂	86,5	67,8	65,6	56,9	56,2	68,4	70,6	37,3
TiO₂	0,53	0,95	0,91	1,42	0,89	0,69	0,64	0,34
Al₂O₃	5,71	15,4	15,1	12,3	15,3	13,5	12,6	7,91
Fe₂O₃	2,69	6,46	6,09	6,18	6,48	5,3	4,97	3,18
MnO	0,02	0,07	0,15	0,11	0,07	0,09	0,08	0,1
MgO	0,69	1,73	1,82	4,2	2,35	1,68	1,51	1,07
CaO	0,05	0,42	1,94	5,82	5,74	2,38	1,61	26
Na₂O	0,02	1,07	0,87	1,92	1,28	3,15	2,76	0,92
K₂O	1,55	2,74	3,03	1,9	2,8	2,62	2,2	0,51
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
n=	11	23	30	16	18	12	119	12
P₂O₅	0,02	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,02	0,1
V	51	123	159	100	126	71	79	103
Cr	55	82	88	225	71	55	44	31
Ni	19	231	58	130	49	30	8	5
Zn	29	52	104	84	114	69	0	66
Rb	60	123	133	72	125	93	0	10
Sr	29	134	113	233	168	310	110	879
Y	17	31	40	21	35	36	37	15
Zr	417	238	260	191	187	333	413	58

El hierro total es reportado como Fe₂O₃, “n” es el número de muestras en cada uno de los promedios. (1) Formación Shawangunk cerca de Ellenville, New York (cuarzo arenita) (2) Miembro Milport de la Formación Rhinestreet, Elmira, New York (arenita lítica/ waca) (3) Formación Oneota, Unadilla, New York (arenita lítica/ waca) (4) Formación Cloridorme, St. Yvon y Gros Morne, Québec (5) Miembro Austin Glen de la Formación Normanskill, Poughkeepsie, New York (arenita lítica/ waca) (6) Miembro Renessalaer de la Formación Nassau, cerca de Grafton, New York (arenita feldespática / waca) (7) Miembro Renessalaer (arenita feldespática/ waca) (8) Turbiditas de DSDP site 379A (arenitas líticas, waca).

La relación entre composición química y tipo de roca sedimentaria puede expresarse en un diagrama triangular, en el cual los ápices son: el SiO_2 ; el $(\text{Al,Fe})_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ y $(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$. (Figura A10)

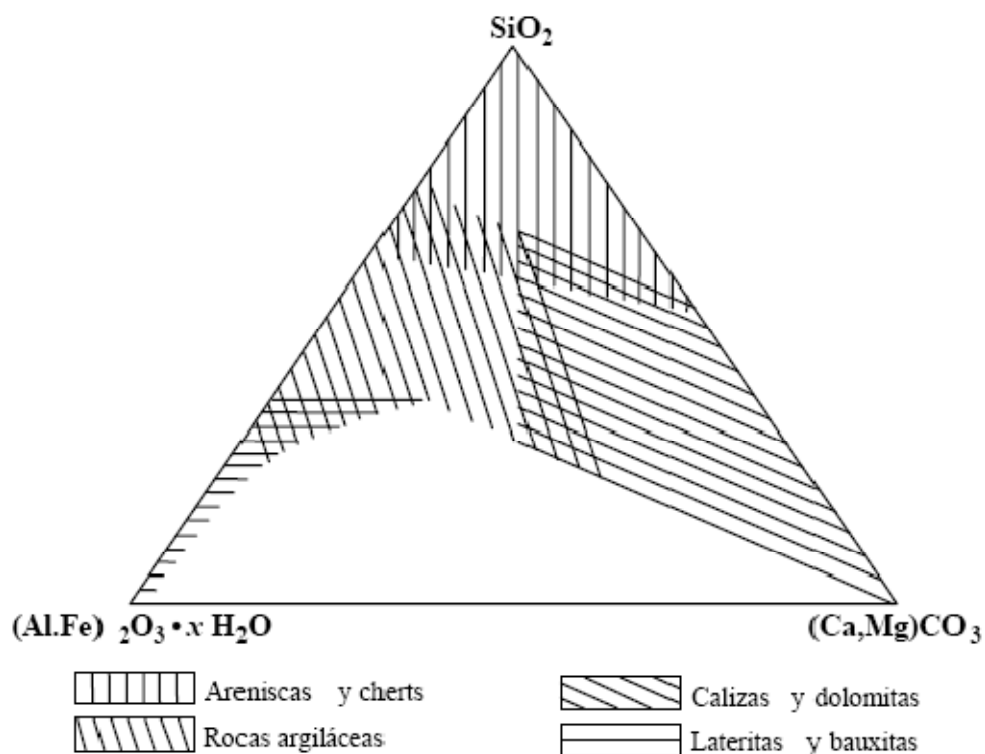


Figura A10. Composición química de sedimentos comunes. Los sedimentos que caen el área en blanco son raros o no existen. Tomado de MASON (1958)

La composición química de las rocas fuentes es probablemente lo que mayormente controla la química de las rocas sedimentarias, aunque esto puede ser grandemente modificado por los procesos subsecuentes (ROLLINSON 1993). A través del examen de la composición química de rocas sedimentarias clásticas terrígenas, se puede deducir la proveniencia; y reconstruir la evolución tectónica de una cuenca sedimentaria.

Las variaciones en la composición de los tres tipos mayores de rocas sedimentarias se ilustran en la Figura A11. La ordenada en esta Figura es $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, y tanto la arenisca como la roca carbonática muestran mayor variación en este parámetro, que en la abscisa, $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}$. Esta variación es debida primeramente a la diferencia en la cantidad de cuarzo, chert y minerales de arcilla en areniscas y carbonatos. Los carbonatos tienen altos

valores de CaO y bajos valores de Na₂O y K₂O, mientras que lutita y arenisca son bajas en Na₂O y CaO y altas en K₂O (FAURE 1998).

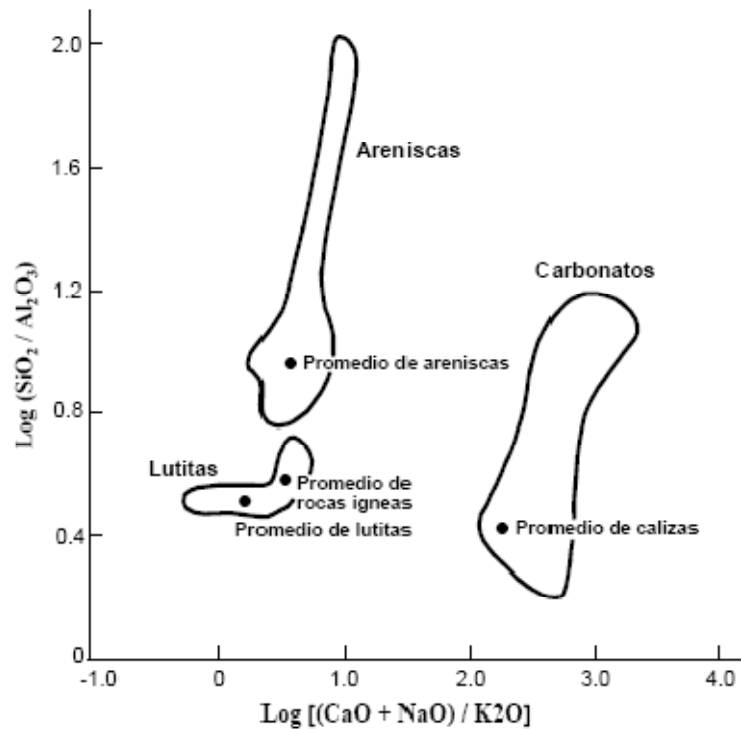


Figura A11. Variación en composición de areniscas, lutitas y rocas carbonáticas. Las composiciones de las rocas están en porcentaje en peso. Tomado de FAURE (1998)

Como puede observarse, las areniscas y carbonato representan segregaciones de los óxidos SiO₂ y CaO, respectivamente. En vista de que las lutitas representan la menor segregación de SiO₂ y CaO durante los procesos de meteorización y debido a que la mayoría de las rocas sedimentarias son lutitas, la composición promedio para las lutitas está muy cerca de la composición promedio para las rocas ígneas (FAURE 1998).

4.1 CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS TERRÍGENOS SEGUN HERRON (1988, en CHACÍN 2003)

En años recientes se ha introducido una nueva herramienta en el campo de la caracterización de formaciones de sedimentos terrígenos, que permiten en base a la información geoquímica establecer un esquema de clasificación de areniscas y lutitas que

difiere mucho de los anteriores esquemas elaborados en base a la clasificación petrográfica como las de FOLK (1968) y PETTIJOHN *et al.* (1972, en HERRON 1988), donde a veces ocurren ambigüedades por la matriz, los fragmentos líticos o por no poder establecer adecuadamente los límites composicionales exactos en estos esquemas (NOGUERA & YÉPEZ 2002).

HERRON (1988), presenta un esquema para clasificar areniscas y lutitas usando los logaritmos de las relaciones de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (figura A12) y las concentraciones de Ca (%). Tal caracterización resulta beneficiosa en la correlación de pozos, interpretación de los ambientes de depositación, evaluación de la calidad de reservorio, análisis del marco tectónico y en general a la geología de subsuelo (NOGUERA & YÉPEZ 2002).

La relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ha sido descrita como un indicador de madurez mineralógica (PETTIJOHN *et al.* 1972).

La relación de hierro total, expresada como Fe_2O_3 , y K_2O son efectivos en distinguir fragmentos líticos de feldespatos en una amplia variedad de areniscas. La relación de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ puede ser expresada como un indicador de estabilidad mineralógica (HERRON 1988).

A bajas temperaturas y presiones características de los ambientes de sedimentación, los minerales formadores de rocas más estables son los feldespatos-K, mica (muscovita), y cuarzo, de los cuales los dos primeros son ricos en K y los tres son bajos en contenido de Fe. En contraste, los minerales formadores de roca menos estables, comúnmente ocurren en fragmentos líticos, tienden a ser enriquecidos en Fe y Mg (HERRON 1988).

Por lo tanto, como una regla general: los compuestos de minerales estables tienen bajas relaciones de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$, y los compuestos de minerales menos estables, localizados cerca de la fuente de sedimentos y conteniendo abundantes fragmentos líticos, tienen relaciones altas de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$. Solamente en cuarzoarenitas muy maduras, conteniendo poco Fe y K, tendrán relaciones insignificantes (HERRON 1988).

Un tercer eje del total de Ca, (no mostrado en la Figura A12) divide las muestras en el sistema de clasificación de areniscas en no calcáreas ($\text{Ca} < 4\%$), calcáreas ($4\% < \text{Ca} < 15\%$), y carbonáticas ($\text{Ca} > 15\%$). La calcita y dolomita son importantes componentes diagénéticos de areniscas y éstas no pueden corresponder apropiadamente en un sistema de clasificación de areniscas. Este eje es incluido porque la cementación carbonática tiene importancia para la formación de propiedades tales como porosidad, permeabilidad y dureza de la roca (HERRON 1988).

Este mismo autor indica que para muchas areniscas, las concentraciones de Ca están por arriba del 1%, indicando fuertemente algo de cementación carbonática; para otras areniscas, la fuente del Ca puede ser minerales no carbonáticos incluyendo la plagioclasa. La línea divisoria de 4% fue deliberadamente elegida para evitar describir areniscas libre de carbonato como calcáreas a riesgo de perder algunas ligeramente calcáreas. La división entre una arenisca calcárea y una arenisca carbonática es usualmente tomada a 50% de carbonato. La división en este esquema de $\text{Ca} = 15\%$ refleja cerca de 50% de un carbonato de partes iguales de calcita y dolomita (HERRON 1988).

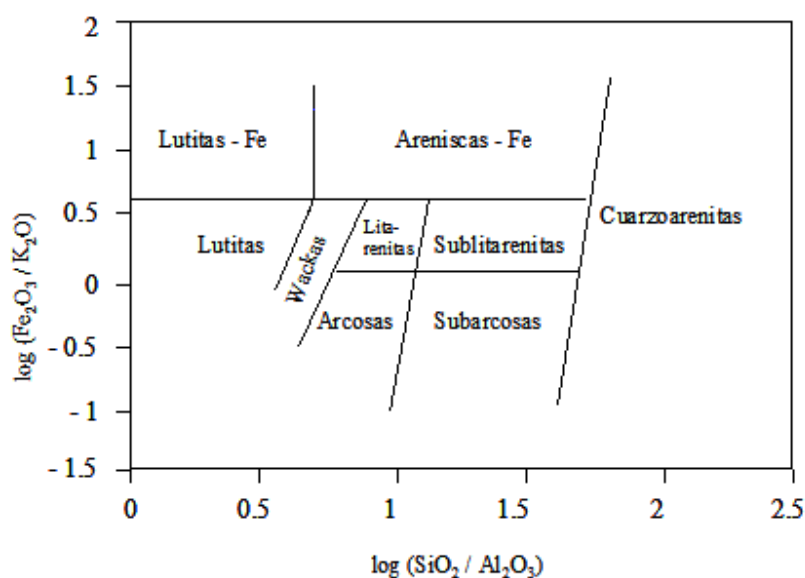


Figura A12. Sistema de clasificación de sedimentos terrígenos. Tomado de HERRON (1988).

Varias de las categorías mostradas en la Figura A12 (cuarzoarenita, subarcosa, sublitarenita, litarenita y wacka) siguen el esquema de clasificación de areniscas de DOTT (1964), FOLK (1968) y PETTIJOHN *et al.* (1972). La lutita, no presentada en el esquema geoquímico de PETTIJOHN *et al.* (1972), es distinguida de la wacka principalmente por una relación baja de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ya que son abundantes en minerales de arcilla. Las muestras con muy alta relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (> 4) son clasificadas como ricas en hierro o ferruginosas, y más allá en pobres condiciones como arenitas ricas en Fe (ricas en glauconita) o lutitas ricas en Fe (conteniendo abundante pirita o siderita) en base a la relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (HERRON 1988).

5. GEOESTADÍSTICA

La aplicación de técnicas estadísticas y el proceso de interpretación de esta información para la resolución de un problema geológico se conoce con el nombre de Geoestadística. Para el desarrollo del presente trabajo especial de grado se utilizó la estadística univariante y la multivariante, a continuación se presentarán los conceptos básicos más importantes de cada una:

5.1. ESTADÍSTICA UNIVARIANTE

Existen dos medidas principales de interés para cualquier conjunto de datos: la localización de su centro y su variabilidad. La tendencia central de un conjunto de datos es la disposición de éstos para agruparse ya sea alrededor del centro o de ciertos valores numéricos. La variabilidad de un conjunto de datos es la dispersión de las observaciones en el conjunto (DAVIS 1973).

Existen principalmente tres medidas de tendencia central: la media, la mediana y la moda.

Media: la media de las observaciones $X_1, X_2, \dots, X_n$ es el promedio aritmético de éstas y se denota por:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \text{ donde } X_i \text{ es cada uno de los valores, y } n \text{ el número de muestras.}$$

Mediana: Es el valor de la variable tal que el número de observaciones menores que él es igual al número de observaciones mayores que él. Si el número de datos es par, se puede tomar la media aritmética de los dos valores centrales.

Moda: La moda de un conjunto de observaciones es el valor de la observación que ocurre con mayor frecuencia en el conjunto. La moda muestra hacia qué valor tienden los datos a agruparse.

Dentro de las medidas de dispersión o variabilidad tenemos:

Varianza: Es, en esencia, el promedio del cuadrado de las distancias entre cada observación y la media del conjunto de observaciones. La varianza es una medida razonablemente buena de la variabilidad debido a que si muchas de las diferencias son grandes (o pequeñas) entonces el valor de la varianza S^2 será grande (o pequeño). El valor de la varianza puede sufrir un cambio muy desproporcionado, aun más que la media, por la existencia de algunos valores extremos en el conjunto.

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)$$

La raíz cuadrada positiva de la varianza recibe el nombre de **Desviación Estándar** y se denota por:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$$

La varianza y la desviación estándar no son medidas de variabilidad distintas, debido a que la última no puede determinarse a menos que se conozca la primera. A menudo se prefiere la desviación estándar en relación con la varianza, porque se expresa en las mismas unidades físicas de las observaciones.

Otra medida de dispersión muy útil cuando se trabaja con más de una variable es la **Covarianza**, la cual es una medida de la variabilidad conjunta de dos variables X e Y. De esta forma la covarianza es una medida de asociación entre los valores de X y de Y, y sus respectivas dispersiones. Si, por ejemplo, se tiene una alta probabilidad de que valores grandes de X se encuentren asociados con valores grandes de Y, la covarianza será positiva. Por otro lado, si existe una alta probabilidad de que valores grandes de X se encuentren asociados con valores pequeños de Y o viceversa, la covarianza será negativa. Si X e Y son estadísticamente independientes, la covarianza es cero. De forma general, la covarianza se define por:

$$S_{xy} = \frac{\sum f_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} = \frac{\sum f_i x_i y_i}{N} - \bar{x} * \bar{y}$$

Percentiles: El término percentil se usa cuando nos referimos a una distribución de observaciones, y se refiere al valor por debajo del cual se encuentra un porcentaje determinado de la distribución de valores. Por ejemplo, el percentil 25 ó 25avo es el valor por debajo del cual se encuentra está situado el 25% de la distribución de valores.

Gráficos exploratorios: Son los gráficos que se construyen, luego de obtener todos los datos y tienen como fin observar de forma global su comportamiento y las relaciones existentes entre las variables. Son de mucha utilidad porque permiten visualizar rápidamente los datos brutos sin ningún tipo de análisis previo. Los gráficos de dispersión, son los gráficos cuya representación entre dos o más variables, permite observar las relaciones lineales existentes entre ellas. Cada dato es representado por un punto e indica una sola observación, representado en ejes cartesianos X, Y.

Diagramas de cajas: Cuando un grupo de datos es analizado existe la necesidad de conocer el centro y dispersión de los valores con respecto al valor central, así como de la existencia de valores extremos (conocidos como anómalos), o de estudiar la distribución de los valores a lo largo del eje de medida. Los diagramas de cajas son utilizados para examinar la distribución de una variable, su centro, su dispersión y sus anómalos.

Estos diagramas representan un rectángulo, con líneas y puntos (figura A13), donde el tope y el fondo del mismo representan los percentiles 75 y 25 respectivamente y la mediana o percentil 50 corresponde a una línea dentro de la caja. El ancho de este es arbitrario mientras que el alto corresponde al rango intercuartil.

El valor adyacente superior es la mayor observación que es menor o igual que el percentil 75 más 1,5 veces el rango intercuartil. El valor adyacente inferior es la observación más pequeña que es mayor o igual al percentil 25 menos 1,5 veces el rango intercuartil. Los valores adyacentes son representados como líneas en forma de T que se extienden desde cada límite de la caja.

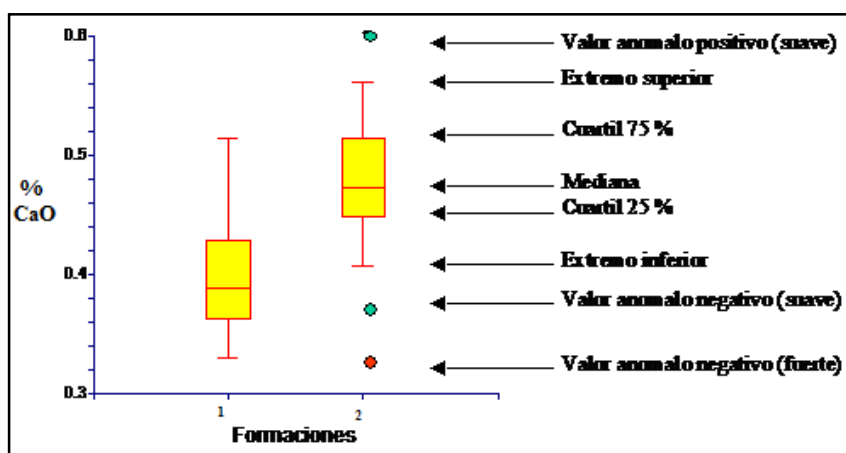


Figura A13. Ejemplo de diagrama de caja.

Técnicas de estimación de tendencias

Promedio móvil: Este método se puede utilizar para reducir la variación presente en un conjunto de datos; para eliminar fluctuaciones indeseables. Este proceso permite la suavización de la serie. Una desventaja de este método es que los datos al comienzo y al final de una serie se pierden. Otra desventaja es que los promedios móviles pueden generar ciclos u movimientos que no estaban presentes en los datos originales. Una tercera desventaja es que los promedios móviles se ven muy afectados por los valores extremos (SPIEGEL 1991).

Método de los mínimos cuadrados: Este método se puede utilizar para hallar la ecuación de la recta o curva de tendencia adecuada. De todas las curvas que aproximan un conjunto de datos, la que tiene la propiedad de que $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2$ sea mínimo se llama curva de ajuste (SPIEGEL 1991).

Gráficos de dispersión: Corresponden a gráficos de dos variables permitiendo relaciones lineales entre ellas (figura A14). En estos diagramas cada dato es representado por un punto que indica una sola unidad de observación sobre la cual se han hecho dos mediciones distintas, una para cada variable, representadas en cada uno de los ejes X y Y.

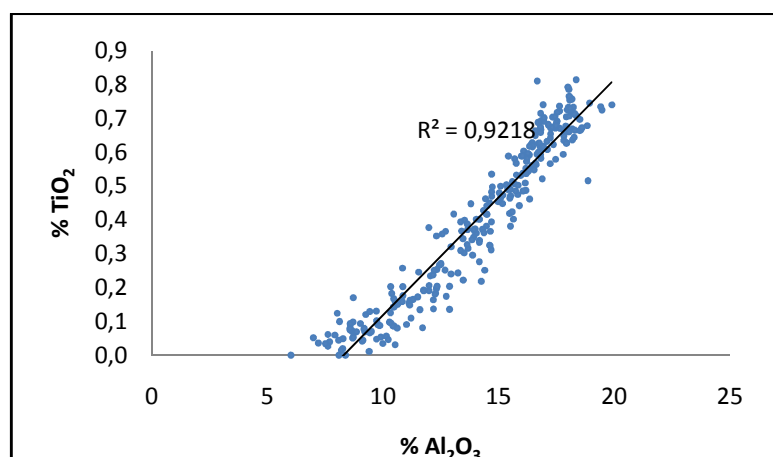


Figura A14. Ejemplo de grafico de dispersión, adicionalmente se muestra el coeficiente de correlación (R^2) entre las variables.

A partir de un diagrama de dispersión es posible calcular curvas o líneas de regresión (recta a la cual se ajusta la distribución de los datos), además de calcular el coeficiente de correlación R , el cual es una medida estadística que describe la fuerza de la relación entre dos variables. El mismo varía entre uno (1) y menos uno (-1). El coeficiente de correlación se calcula mediante:

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Cuando la línea de regresión es horizontal indica que no existe relación alguna entre las dos variables comparadas y se refleja con un coeficiente de correlación igual a cero. De manera distinta, cuando esta recta de regresión presenta pendiente, significa que las variables comparadas si se relacionan entre sí. Si la pendiente de esta recta es positiva, indica que la relación existente entre las variables comparadas es directa o positiva y el coeficiente de correlación será positivo, por el contrario, si esta recta tiene pendiente negativa indica que la relación entre las dos variables es inversa o negativa.

Para saber cuando un coeficiente de correlación resulta estadísticamente representativo de una buena combinación lineal, se usa el coeficiente de correlación crítico (R_c), el cual indica a partir de qué valor los coeficientes de correlación expresan correlaciones lineales con un 95 y un 99 % de confiabilidad. El valor de los coeficientes de estos porcentajes fue

calculado a partir de la tabla de valores críticos para coeficientes de correlación-(ver tabla A13) según el número de muestras para cada núcleo (NOGUERA & YEPEZ 2002).

Tabla A13. Coeficientes críticos de correlación (R_c). Tomado de CROW (1960).

f	Total number of variables				f	Total number of variables			
	2	3	4	5		2	3	4	5
1	.997 1.000	.999 1.000	.999 1.000	.999 1.000	24	.388 .496	.470 .565	.523 .609	.562 .642
2	.950 .990	.975 .995	.983 .997	.987 .998	25	.381 .487	.462 .555	.514 .600	.553 .633
3	.878 .959	.930 .976	.950 .983	.961 .987	26	.374 .478	.454 .546	.506 .590	.545 .624
4	.811 .917	.881 .949	.912 .962	.930 .970	27	.367 .470	.446 .538	.498 .582	.536 .615
5	.754 .874	.836 .917	.874 .937	.898 .949	28	.361 .463	.439 .530	.490 .573	.529 .606
6	.707 .834	.795 .886	.839 .911	.867 .927	29	.355 .456	.432 .522	.482 .565	.521 .598
7	.666 .798	.758 .855	.807 .885	.838 .904	30	.349 .449	.426 .514	.476 .558	.514 .591
8	.632 .765	.726 .827	.777 .860	.811 .882	35	.325 .418	.397 .481	.445 .523	.482 .556
9	.602 .735	.697 .800	.750 .836	.786 .861	40	.304 .393	.373 .454	.419 .494	.455 .526
10	.576 .708	.671 .776	.726 .814	.763 .840	45	.288 .372	.353 .430	.397 .470	.432 .501
11	.553 .684	.648 .753	.703 .793	.741 .821	50	.273 .354	.336 .410	.379 .449	.412 .479
12	.532 .661	.627 .732	.683 .773	.722 .802	60	.250 .325	.308 .377	.348 .414	.380 .442
13	.514 .641	.608 .712	.664 .755	.703 .785	70	.232 .302	.286 .351	.324 .386	.354 .413
14	.497 .623	.590 .694	.646 .737	.686 .768	80	.217 .283	.269 .330	.304 .362	.332 .389
15	.482 .606	.574 .677	.630 .721	.670 .752	90	.205 .267	.254 .312	.288 .343	.315 .368
16	.468 .590	.559 .662	.615 .706	.655 .738	100	.195 .254	.241 .297	.274 .327	.300 .351
17	.456 .575	.545 .647	.601 .691	.641 .724	125	.174 .228	.216 .266	.246 .294	.269 .316
18	.444 .561	.532 .633	.587 .678	.628 .710	150	.159 .208	.198 .244	.225 .270	.247 .290
19	.433 .549	.520 .620	.575 .665	.615 .698	200	.138 .181	.172 .212	.196 .234	.215 .253
20	.423 .537	.509 .608	.563 .652	.604 .685	300	.113 .148	.141 .174	.160 .192	.176 .208
21	.413 .526	.498 .596	.552 .641	.592 .674	400	.098 .128	.122 .151	.139 .167	.153 .180
22	.404 .515	.488 .585	.542 .630	.582 .663	500	.088 .115	.109 .135	.124 .150	.137 .162
23	.396 .505	.479 .574	.532 .619	.572 .652	1000	.062 .081	.077 .096	.088 .106	.097 .115

5.2. ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE

Cuando para cada muestra se dispone de valores correspondientes a dos o más variables que las caracterizan, el análisis estadístico se realiza utilizando todas las variables disponibles. Estos métodos resultan muy poderosos ya que permiten manipular más variables de las que pueden ser asimiladas, sin esta clase de tratamiento o mediante la simple observación de una tabla de resultados, sin embargo su estructura teórica y operacional resulta más complicada que aquellas empleadas para datos correspondientes a una sola variable (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

Los análisis químicos y radiométricos constituyen un buen ejemplo geológico de datos multivariantes, donde las variables pueden ser concentraciones de un conjunto de elementos químicos, en unidades de porcentajes o partes por millón, en el primero de los casos, o el número de átomos de radioisótopos que se desintegran por unidad de tiempo, para el segundo caso (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

Análisis de agrupaciones: Constituye una de las técnicas de clasificación estadística que ordenan o clasifican un conjunto de objetos u observaciones, en diversos grupos en base a las similitudes internas de las mismas. Supóngase que se tiene una colección de objetos los cuales deben ser ordenados por clasificación jerárquica. Si se tienen n objetos y se han medido m características, el grupo de datos conforma una matriz $n \times m$. Posteriormente, pueden ser realizada algunas medidas de la similitud entre cada par de objetos. Varios coeficientes de similitud han sido utilizados, incluyendo el coeficiente de correlación r_{ij} una medida estandarizada para espacio m dimensionales conocida como distancia Euclidiana, d_{ij} . El coeficiente de distancia viene dado por la ecuación:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2}{m}}$$

Lo que gráficamente se representa en la Figura A15.

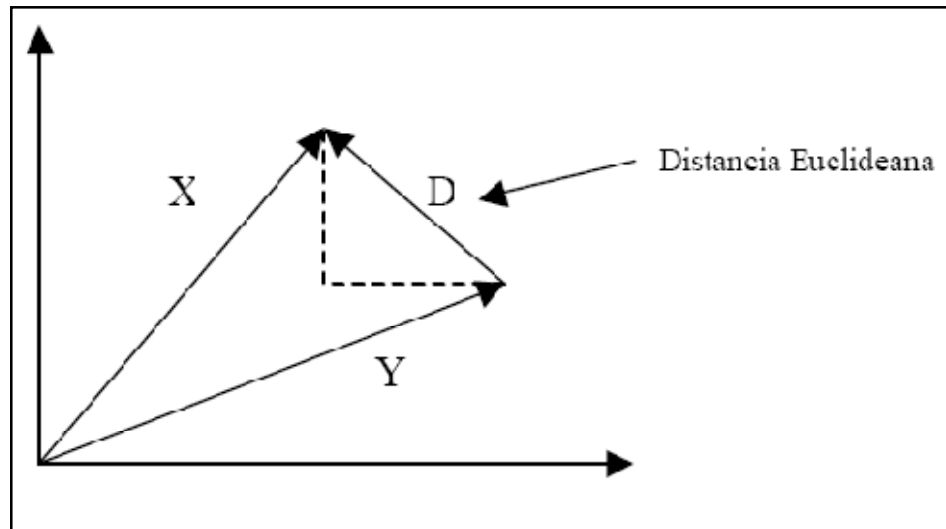


Figura A15. Representación gráfica de la distancia Euclidiana. Tomado de GONZALEZ & SANCHEZ (2001).

Donde X_{ik} denota la k – ésima variable medida del objeto i y X_{jk} denota la k – ésima variable medida del objeto j . Por todo, se midieron m variables para cada objeto, y d_{ij} es la distancia entre el objeto i y el objeto j . Como debería esperarse una distancia pequeña indica que los dos objetos son similares, mientras que una gran distancia indica la diferencia entre los mismos. El próximo paso es organizar los objetos en una jerarquía de manera tal que los objetos con la mayor similitud se colocan juntos. Luego los grupos de objetos son asociados con los grupos más parecidos a ellos y así sucesivamente hasta que todos los objetos han sido colocados en un esquema completo de clasificación que recibe el nombre de Dendrograma (figura A16) (RODRÍGUEZ *et al.* 2000)

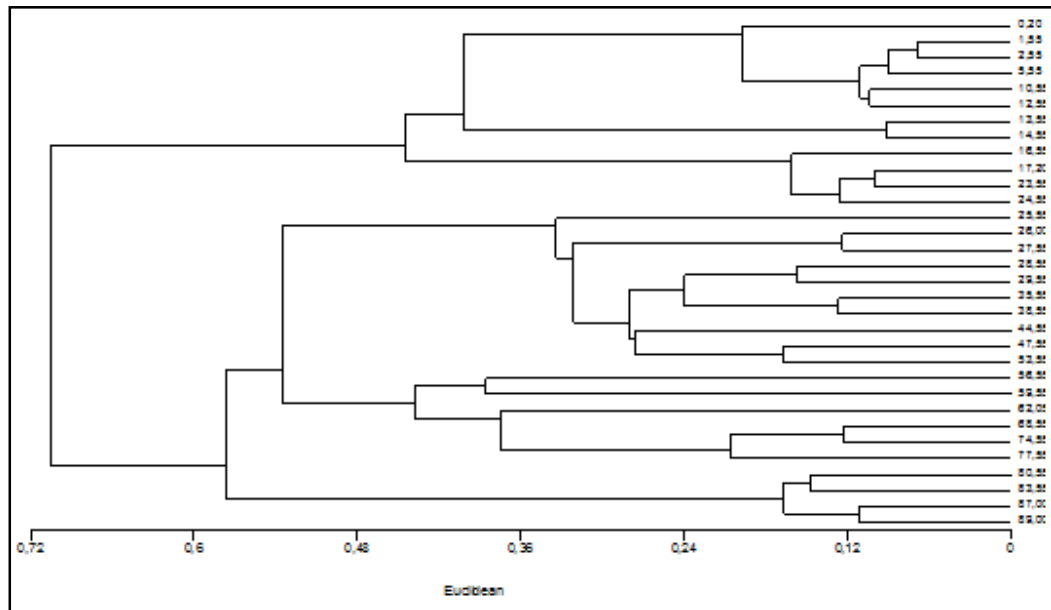


Figura A16. Ejemplo de dendrograma, elaborado con el programa MVSP.

Funciones discriminantes: Este método radica en encontrar una combinación lineal de las variables, las cuales produzcan las máximas diferencias entre los diferentes grupos de muestras (DAVIS 1973).

El proceso de clasificación asociado al de discriminación, consiste en separar las muestras en grupos relativamente homogéneos y siendo distintos de otros grupos, sobre la base de las variables medidas. Existen pues, varias diferencias obvias entre el proceso de clasificación y el proceso de discriminación: la clasificación tiene una base interna, es decir, no depende de un conocimiento previo acerca de las relaciones entre los grupos como en las funciones discriminantes (DAVIS 1973).

Una función discriminante lineal simple transforma un conjunto original de medidas en un solo valor discriminante simple. Este valor o variable transformada, representa la posición de la muestra a lo largo de una línea definida por la función lineal discriminante (DAVIS 1973). La función que se busca es aquella combinación lineal de un conjunto de variables, que produzca la máxima diferencia entre dos o más grupos previamente definidos por el usuario.

Cuando se calculan funciones lineales discriminantes, que representen la mejor discriminación posible entre grupos establecidos con anterioridad, se utilizan un conjunto de manipulaciones matemáticas, como lo son: suma de variables, suma de cuadrados de las variables, y suma de los productos cruzados de las variables. De esta manera se obtiene finalmente una ecuación del tipo:

$$F_m = a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 \dots\dots\dots p_1x_n$$

Donde F_m es una de las funciones; a_1 , b_1 , c_1 y p_1 representan los coeficientes de la función; x_1 , x_2 , x_3 y x_n son las mediciones correspondientes a cada variable utilizada, las cuales pueden ser SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO entre otras; m es el numero funciones o grupos, y n constituye el numero de variables.

La magnitud del coeficiente, asociado a su variable muestra la importancia relativa de dicha variable en la separación de los grupos a lo largo de la función, así la visualización de los factores permite observar el efecto que produce una o más variables en la separación de los grupos.

Cuando las funciones ya han sido determinadas y muestran que clasifican bien las muestras de los grupos definidos, entonces una muestra desconocida puede ser clasificada en uno u otro de los grupos, simplemente sustituyendo los valores correspondientes a las variables (x_1 , x_2 , x_3 x_n) en cada una de las funciones. Una muestra se clasifica como perteneciente a un grupo si su función da un valor mayor que el obtenido en cualquiera de las otras funciones. Esta técnica se puede extender a cualquier numero de grupos definidos y a tantas variables como se tengan, y se calculara una nueva función para cada grupo adicional.

Una manera gráfica de representar estas funciones puede observarse en la figura A17. En esta se evidencia que para un caso bidimensional, en el cual intervienen dos variables, no puede hacerse una separación adecuada entre grupos utilizando únicamente dichas variables, sin embargo es posible encontrar una orientación a lo largo de la cual la

separación entre los grupos esta mejor definida. En este caso los ejes coordenados de la orientación definen cada función discriminante (DAVIS 1973).

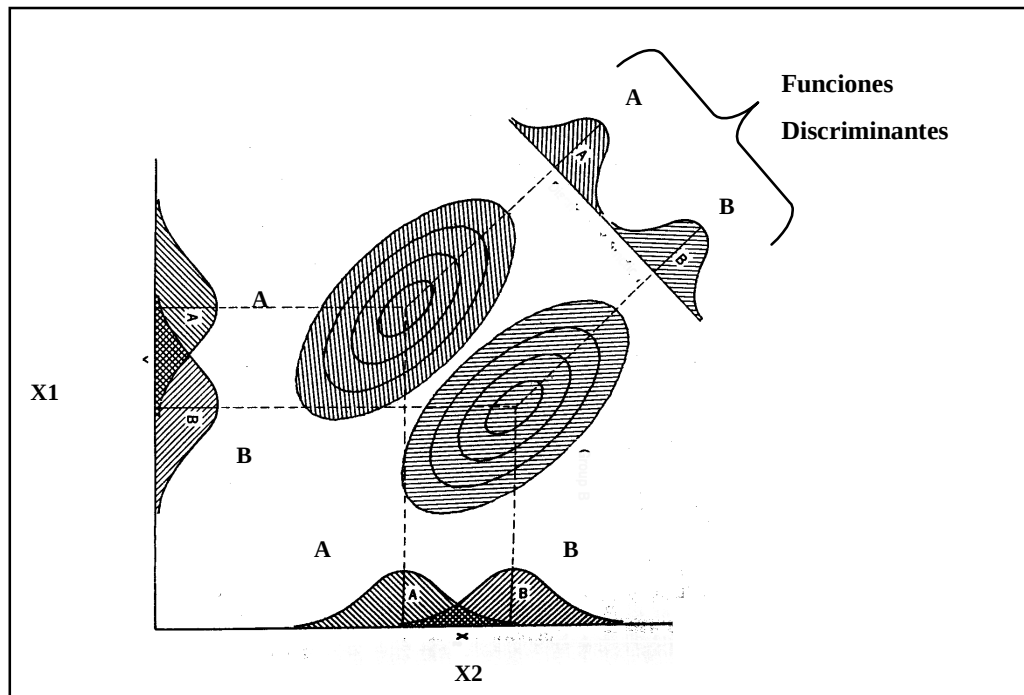


Figura A17. Funciones discriminantes para los grupos A y B. Cada grupo está caracterizado por las variables, X1 y X2. Tomado de DAVIS (1973)

Estas funciones constituyen uno de los procedimientos multivariantes más ampliamente usados en las Ciencias de la Tierra sobre todo para localizar muestras de origen desconocido en grupos previamente establecidos, los cuales pueden ser ambientes, fuentes de aporte, categorías taxonómicas, unidades litoestratigráficas y otros (CAMPOSANO & MARTÍNEZ, 2000).

Prueba Z

Si un número grande de muestras aleatorias e independientes de dos poblaciones normales es seleccionada, la distribución de la diferencias entre las medias de ambas también es normal. Basado en este concepto surge la prueba de hipótesis estadística Z, teniendo como condiciones de aplicación que las variables sigan una distribución normal

y/o que el tamaño de las muestras sea igual o superior a 30. El valor de Z se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Donde $\bar{X}_i$ = promedio de la variable.

S_i = desviación estándar.

n_i = numero de muestras.

El valor de Z, se compara con una tabla que contiene el porcentaje de área bajo la curva normal entre la media y el puntaje Z. En esta prueba de hipótesis estadística, es costumbre declarar la hipótesis como verdadera si la probabilidad (Z) calculada excede el valor tabular llamado el nivel de significación y se declara falsa si la probabilidad calculada es menor que el valor tabular. Para porcentajes de 99% ($\alpha=0,01$) y 95% ($\alpha=0,05$) de confiabilidad, los valores de Z deben ser mayores de $Z_{0,01} = 2,329$ y $Z_{0,05} = 1.645$ respectivamente.

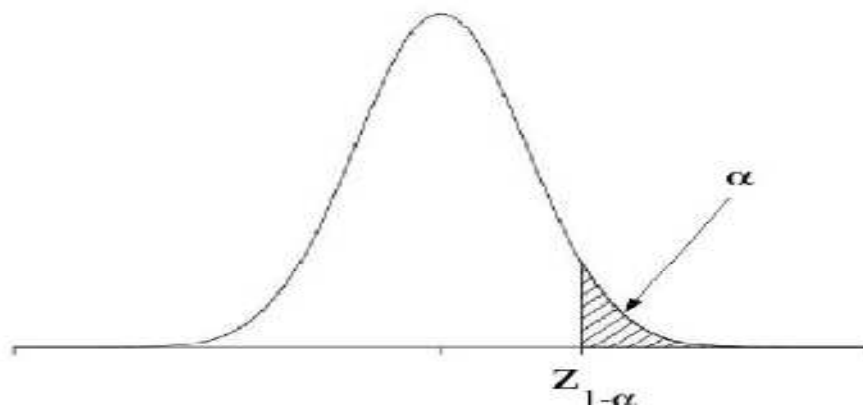


Figura A18. Distribución normal de la prueba Z.

El uso y formulación correcta de esta prueba de hipótesis, le permiten al investigador poner a prueba aspectos de la realidad, disminuyendo la distorsión que pudieran producir sus propios deseos o gustos.

APENDICE 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Para este Trabajo Especial de Grado se utilizaran 359 muestras de pozos geofísicos y 32 muestras SPT, las cuales fueron recolectadas por la empresa GISCA entre marzo y junio de 2006, para FUNVISIS en el marco del Proyecto de Microzonificación del Riego Sísmico de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare (Figura A19).



Figura A19. Vistas de la ejecución de la perforación del pozo 3. Tomado de GISCA (2006).

Para este trabajo especial de grado se utilizaran muestras extraídas de tres pozos diferentes (tabla A14).

Ubicación	Tipo de Perforación	Nomenclatura	Profundidad final (m)	Numero de muestras recolectadas
Barquisimeto	Pozo geofísico	P-3	105	73
Barquisimeto	SPT	P-1	91,5	32
Cabudare	Pozo geofísico	P-6	300	286

Tabla A14. Ubicación y cantidad de muestras usadas en el presente trabajo especial de grado.

Es importante señalar que para los pozos geofísicos las muestras fueron tomadas cada metro, comenzando desde la superficie en el pozo 6 (P-6) y desde 10 metros de profundidad en el pozo 3 (P-3).

El trabajo se dividió en tres etapas fundamentales:

1. Fase de preparación de muestras.
2. Fase de laboratorio.
3. Fase de procesamiento de datos.

A continuación se describirán la metodología y los materiales usados en cada fase.

1. FASE DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras fueron secadas al aire libre durante 60 días. Posteriormente usando una balanza electrónica se selecciona una fracción de 200 gr separadas en dos bolsas diferentes, una de 170 gr y otra de 30 gr.

De la muestra de 30 gr, se selecciono la mitad, la cual fue disgregada o pulverizada utilizando un mortero y un mazo de cerámica (figura A20). Cabe destacar, que para cuidar

que todas las muestras tuvieran un tamaño de grano homogéneo las mismas debían pasar por la abertura del tamiz 120. Las muestras una vez disgregadas, fueron guardadas en pequeñas bolsas plásticas tipo clip, debidamente rotuladas.

Cabe señalar que el mortero por su naturaleza silíceo, es muy adecuado para los procesos de desintegración y mezclado de muestras de media y alta dureza, así mismo tiene una gran resistencia a agentes físicos y químicos, siendo únicamente atacada por el ácido fluorhídrico.



Figura A20. Foto del mortero utilizado.

Las características físicas del mortero son:

Densidad: 2.6 g/cm^3 .

Dureza: 7 grados de la escala Mohs, que es igual a la del cuarzo (SiO_2).

Punto de fusión: $1800 - 2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Resistencia a la compresión: 110 kg/mm^2 .

Resistencia a la rotura: 210 kg/mm^2 .

Para minimizar el riesgo de contaminación de cada una de las muestras, se limpio el mortero y su mazo con alcohol isopropílico y una servilleta limpia, además el tamiz usado se lavo con agua a presión, para cada una de las disgregaciones.

Después de tener las muestras pulverizadas, se procedió a prepararlas en unos portamuestras de plástico. Éstos constan de dos cilindros de diferente diámetro, el cilindro de diámetro menor es introducido dentro del cilindro de diámetro mayor colocando entre ambos una película de Mylar de 0.02 μ de espesor, la cual impide el contacto de la sustancia con el detector del equipo a la vez que protege la muestra de una posible contaminación. Se preparó un portamuestra por cada muestra analizada, desechando el Mylar utilizado después de cada análisis y lavando con agua y jabón los cilindros usados.

Después de colocado 10 g polvo en el portamuestras, el mismo se compactó propinándole 70 pequeños golpes al depósito sobre una mesa, utilizando el mismo número de golpes para todas las muestras y procurando no contaminar la base del depósito. De esta forma, se logró distribuir uniformemente el polvo sobre el Mylar sin necesidad de elaborar pastillas prensadas. El espacio sobrante fue rellenado con servilletas. Estas muestras serán utilizadas para la determinación de los elementos mayoritarios por fluorescencia de rayos X.

2. FASE DE LABORATORIO

Esta fase consistió en la determinación de las características químicas, radiométricas y de color de las muestras utilizando diferentes equipos y metodologías descritas a continuación:

2.1 ESPECTROMETRÍA DE RAYOS GAMMA

El análisis radiométrico se realizó con el sistema de espectrometría de rayos gamma Amptek MCA8000A “POCKET MCA” (figura A21) el cual consta de:

1. Cristal de centelleo de tamaño estándar (30 x 30 mm), compuesto de NaI (Tl).
2. Tubo fotomultiplicador.
3. Fuente generadora y reguladora de alto voltaje (G&RV).
4. Preamplificador y amplificador de señal.

5. Analizador multicanal Amptek MCA8000A, con capacidad para 16.000 canales
6. Software Pmca 2.1

El sistema de espectrometría de rayos gamma Amptek MCA8000A “POCKET MCA” es un equipo portátil controlado por un software ejecutable en PC, bajo ambiente Windows y/o DOS. El analizador multicanal está conectado con el PC a través de una interfase serial, y a la vez el analizador se encuentra conectado con el detector a través de una interfase I/O.

El sistema de espectrometría ha sido diseñado para trabajo de campo, debido a esto el sistema se ha adaptado para trabajo en el laboratorio, con el fin de que las mediciones no fueran afectadas por radiaciones ambientales y/o externas. El detector que incluye cristal de centelleo, tubo fotomultiplicador, fuente generadora y regulador de alto voltaje se encuentran aislados por un cilindro de plomo que impide que la radiación externa afecte la detección y medición de isótopos.



Figura A21. Foto del Espectrómetro de rayos Gamma multicanal utilizado en el presente trabajo, donde se muestra la ubicación del cilindro de plomo y el detector de NaI.

A continuación se muestra las ventanas de medición utilizadas y el rango que abarca cada una de ellas (tabla A15).

Tabla A15. Ventanas de medición utilizadas para la espectrometría de rayos gamma multicanal

Ventana	Valores Kev	
	Inicio	Final
F1	416	569
²¹⁴ Bi	573	677
²¹² Bi	681	791
F2	791	1031
²¹⁴ Bi	1033	1199
F3	1199	1368
⁴⁰ K	1370	1570
F4	1570	1659
²¹⁴ B	1660	1860
F5	1860	2399
²⁰⁸ Tl	2400	2800

La metodología usada para la medición es la siguiente:

1. Se programó el espectrómetro para que realizara las mediciones en un intervalo de 1500 seg.
2. Se limpió cada bolsa de muestra antes de introducirla en el receptáculo de plomo macizo para evitar contaminación por polvo y / o muestras ajenas.
3. Se introdujeron 200 gr de muestra no pulverizada, compuestas por dos bolsas una con 170 gr y otra con 30 gr.
4. Se extraen los resultados por medio del programa anteriormente mencionado para trabajarlos en Excel.
5. Dado que el instrumento emite los resultados en términos de cuentas totales (CT), a las mediciones realizadas se les aplicó un factor de corrección el cual consistió en dividir el

valor dado (CT) entre 1.500 para obtener las cuentas por segundo (cps) correspondientes a cada ventana de medición.

El tiempo y la cantidad de muestra a usar, fue determinada por SOLÓRZANO (2006).

2.2 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

El equipo utilizado fue un espectrómetro de rayos x Philips, Minipal PW4025 (figura 22). Este es un espectrómetro compacto de rayos x por dispersión de energía, diseñado para la detección y cuantificación de elementos químicos, desde Na hasta U, en una muestra con un amplio rango de formas físicas: sólida, líquida o en polvo.



Figura A22. Equipo de fluorescencia de rayos x, Minipal PW4025

El Minipal cuenta con un tubo de emisión de rayos X de 9W, el cual posee un ánodo de Rodio y es enfriado a través de una corriente de aire. En su interior posee 5 filtros (Kapton, Al delgado, Al, Mo, Ag) que pueden ser seleccionados de acuerdo a las características del análisis y que permiten lograr condiciones óptimas de medición. También cuenta con una muestra de referencia compuesta por una aleación de Al y Cu que se coloca sobre el

detector cuando se encuentra en la posición inicial, y que permite al equipo hacer la corrección automática de la ganancia o autocalibración. Además posee un cargador removible que permite analizar hasta 12 muestras de forma sucesiva (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

Posee un detector de Si, enfriado por corrientes termoeléctricas, sellado herméticamente y que posee una delgada ventana de Berilio. Este componente presenta un analizador de 2048 canales que permite detectar los fotones de rayos X (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

El medio en el cual las mediciones son hechas es normalmente el aire, adicionalmente este equipo cuenta con un sistema de flujo de Helio que permite mejorar la sensibilidad de las mediciones de los elementos de bajo número atómico como lo son aquellos que se encuentran entre el Na y el K (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

La operación del espectrómetro y la información obtenida del mismo es controlada por un Software específicamente diseñado para este equipo, el cual es compatible con IBM y PC, bajo el sistema operativo Microsoft Windows (Windows 95 o NT). El mismo lleva por nombre Minipal Software V 1.0 A (1999). Las dimensiones del espectrómetro son de 215 x 530 x 495 mm (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

El espectrómetro de rayos X Philips, Minipal PW4025, determina la concentración de los componentes mayoritarios SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O , en porcentajes (%) y V en partes por millón (ppm).

La metodología empleada para la medición de elementos mayoritarios fue:

1. Se abre la ventana de medición para la aplicación.
2. Se introdujeron 12 envases previamente identificados con aproximadamente 10 gr de muestra en polvo en los portamuestras de plástico
3. La identificación de la muestra se introduce en la computadora.
4. Se realiza la medición.

5. Se extraen los resultados, los que pueden ser copiados en diskette y guardados en un formato Excel.

6. Se realizan correcciones si fuera necesario mediante algoritmos

Las condiciones de medición son la combinación de los parámetros con que cuenta el espectrómetro para realizar un análisis o corrida de muestras. Las condiciones de medición para el equipo de fluorescencia de rayos X, Minipal PW4025 utilizado en el presente trabajo siguieron los lineamientos del trabajo de CAMPOSANO & MARTÍNEZ (2000). Las condiciones de medición utilizadas fueron:

Voltaje: 13 Kv.

Intensidad de la corriente: 30 mA.

Tiempo de medición: 240 seg.

Filtro: sin filtro.

2.3. COLOR MUNSELL

Las muestras pulverizadas son comparadas con la tabla de colores de Munsell la cual está compuesta de hojas, representando cada una de ellas un matiz (Hue) específico que aparece en la parte superior derecha de dicha página. Cada hoja presenta una serie plaquitas o "chips" diferentemente coloreados y sistemáticamente arreglados en la hoja, que representan la claridad (Value) y la pureza (Chroma).

La muestra se compara con la tabla de colores hasta conseguir la más parecida y posteriormente este color es reportado en términos de:

- El matiz (Hue): puede ser R (rojo), Y (amarillo) o B (azul).
- La claridad (Value): puede variar de 1 a 8
- La pureza o saturación (Chroma): toma valores entre 1 y 8

Estos datos son llevados a una hoja de Excel, donde esos colores se transformaran a valores RGB (Red, Green, Blue) usando tablas de correspondencia (Ver tabla A2).

3. FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez obtenidos los datos, los mismos fueron procesados mediante las técnicas estadísticas univariante (diagramas de caja), bivalente (diagramas de dispersión) y multivariante (análisis de agrupaciones y funciones discriminantes). MVSP, STATGRAPHICS 5.1, y Microsoft EXCEL 2008 fueron los programas utilizados en la realización de estos análisis. Adicionalmente al análisis estadístico, se construyeron perfiles de distribución que muestran de forma gráfica la variación en las concentraciones de los componentes químicos en los pozos. A partir del estudio de estas curvas es posible hacer interpretaciones sobre la variación de los componentes, así como también la definición de las unidades químicas que caracterizan cada sección. El análisis de agrupaciones se realiza mediante la elaboración de dendrogramas los cuales fueron generados combinando las variables a través del método del “vecino más lejano” y el criterio de las distancias euclidianas, manteniendo el orden estratigráfico de las muestras.

4. DEFINICIÓN DE UNIDADES QUÍMICAS-RADIOMÉTRICAS

Para definir una unidad sedimentaria es necesario establecer ciertos criterios que permitan en una sección estratigráfica diferenciar y reconocer intervalos con características químicas y/o radiométricas distintivas. Las unidades establecidas en los perfiles químicos y radiométricos fueron definidas siguiendo la metodología que a continuación se presenta:

1. Mediante el análisis de agrupaciones se definieron las unidades “provisionales” (químicas y/o radiométricas), manteniendo el orden estratigráfico de las muestras en los pozos estudiados.
2. Luego de establecidos los límites a través del análisis anterior, se procedió a evaluar el porcentaje de muestras correctamente clasificadas mediante el análisis de funciones discriminantes.

3. Posterior a esto, los límites de las unidades fueron redefinidos en los casos necesarios mediante la observación de los perfiles de abundancia químicos y radiométricos. Estos límites corresponden a marcadores de primer orden y son definidos en base a los siguientes criterios:

- Se considera un marcador, de 1er orden, aquel caracterizado por un valor máximo o un mínimo presente en 4 o más variables, mientras que los definidos por una sola variable son definidos como 2do orden.

- Dicho valor máximo o mínimo debe representar la culminación de una tendencia bien sea de ascenso o de descenso de una variable química o radiométrica.

4. Una vez establecidos los marcadores quimioestratigráficos se procedió a establecer las unidades químicas-radiométricas bajo el siguiente criterio: Una unidad estará comprendida entre dos marcadores, o bien entre un marcador y la base o el tope la sección.

5. Finalmente, dado que los análisis de agrupaciones revelan asociaciones y estructuras en la data, cuando no sean evidentes aparentemente, en este trabajo constituyen la herramienta de mayor peso para la definición de unidades, por lo tanto tendrán más prioridad los límites y unidades definidas en base a esta herramienta que las establecidas por los perfiles de abundancia químicos y/o radiométricos. Sin embargo, es importante destacar que las unidades y los límites de las mismas coincidieron bastante bien con límites definidos únicamente usando los perfiles de distribución.

6. Adicionalmente a las variables químicas, radiométricas y de color Munsell, se considera necesario el uso de las relaciones $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{CaO})$, $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{K}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, así como la radioactividad natural total de las muestras (γ_{total}), con la finalidad de describir mejor las unidades y sus posibles relaciones.

APÉNDICE 4. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN

A continuación se muestran los diagramas de dispersión de las variables químicas de los pozos 1, 3 y 6 (Figuras A23, A24 y A25 respectivamente). Adicionalmente se muestran las líneas de tendencias con su valor de R^2 .

Figura A23. Diagramas de dispersión del pozo 1.

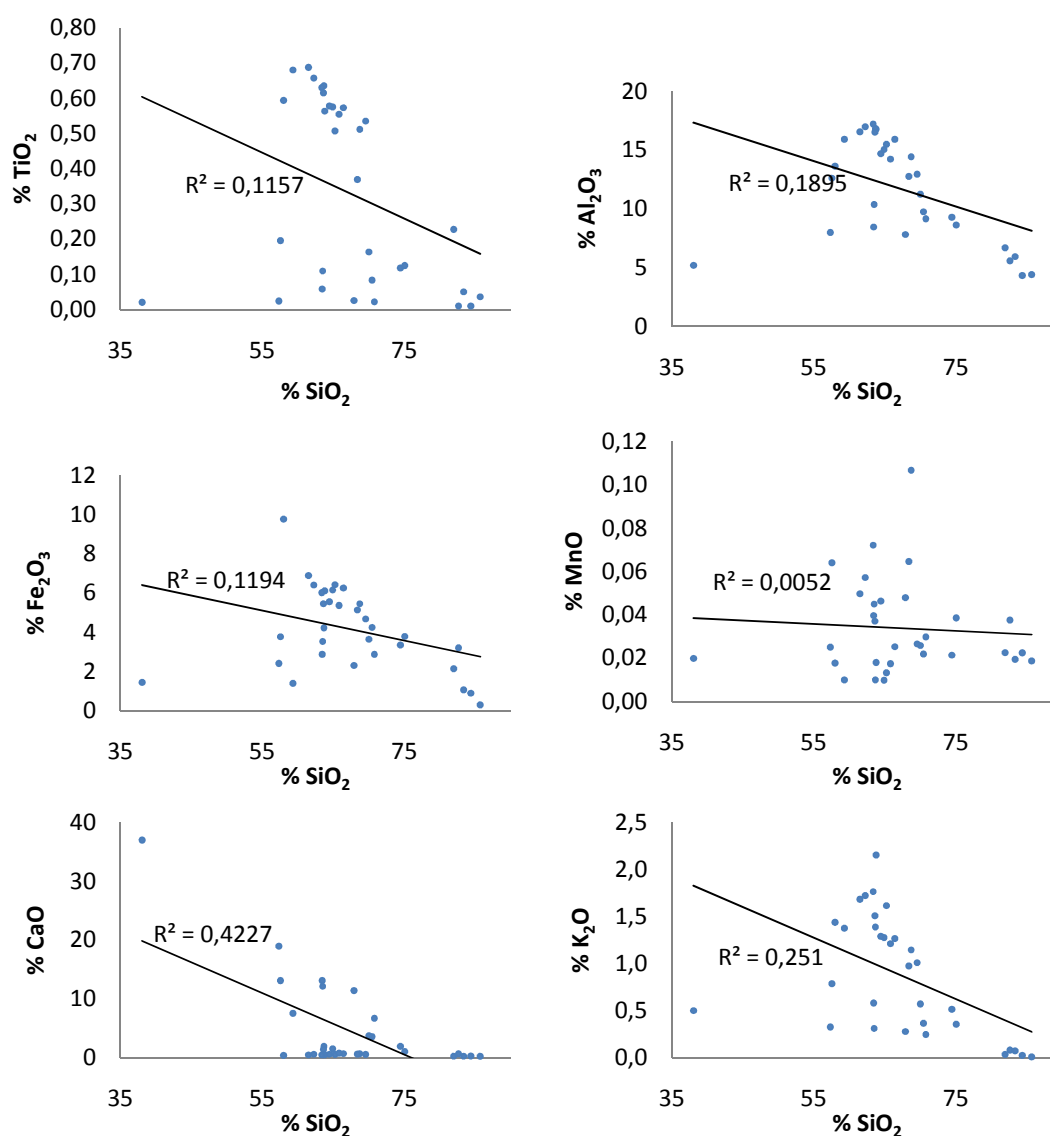


Figura A23. Diagramas de dispersión del pozo 1 (continuación).

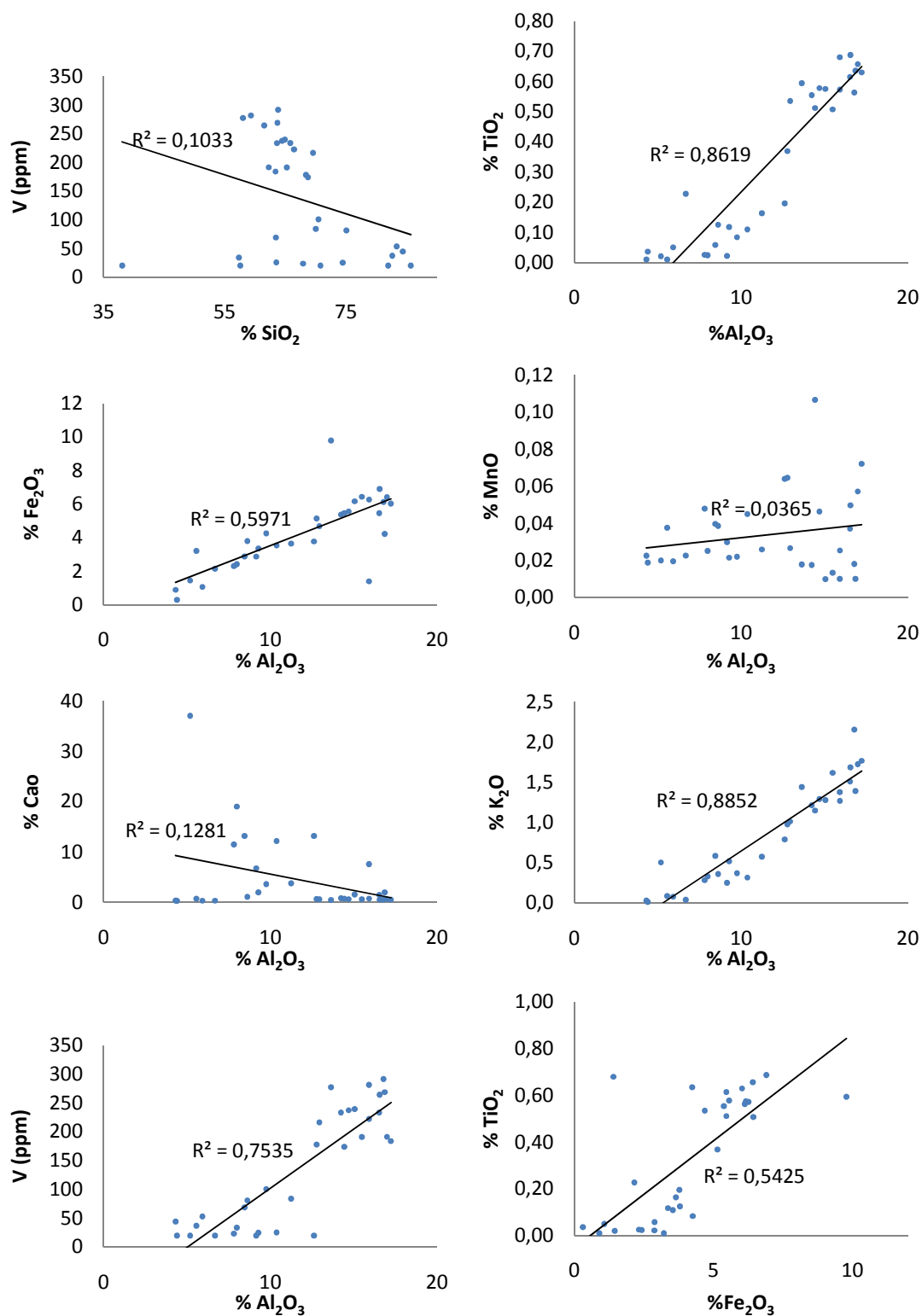


Figura A23. Diagramas de dispersión del pozo 1 (continuación)

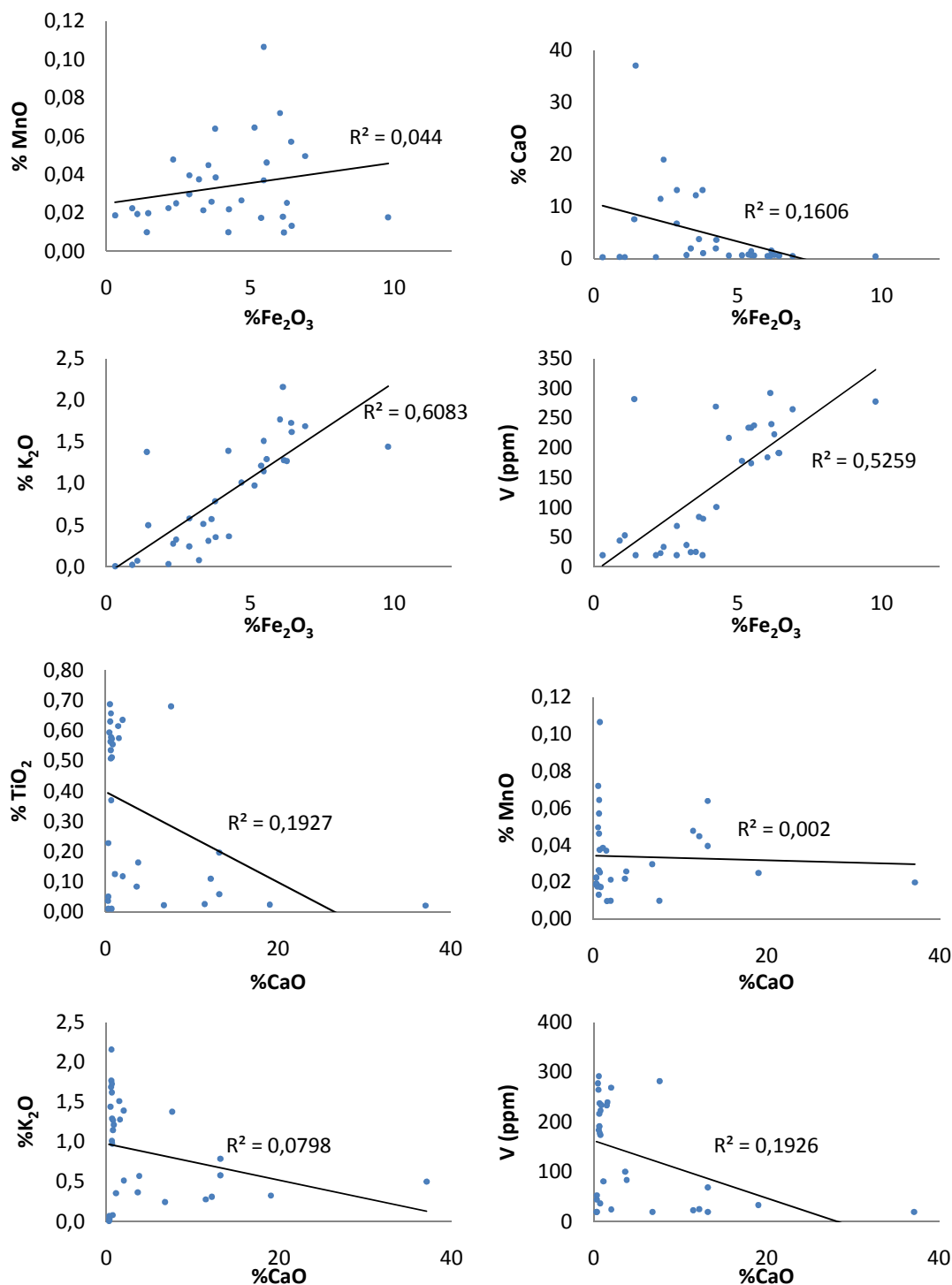


Figura A23. Diagramas de dispersión del pozo 1 (continuación).

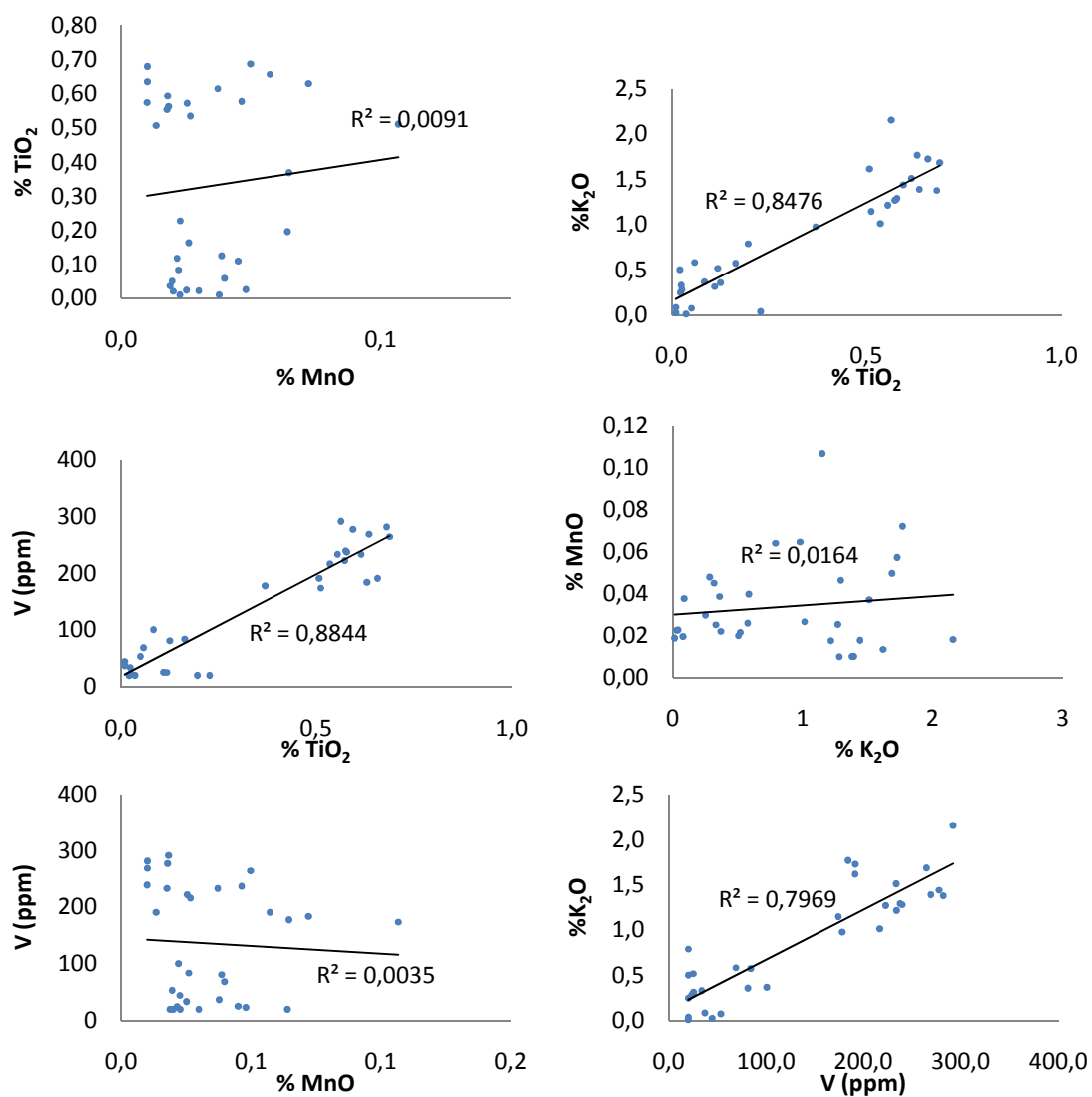


Figura A24. Diagramas de dispersión del pozo 3.

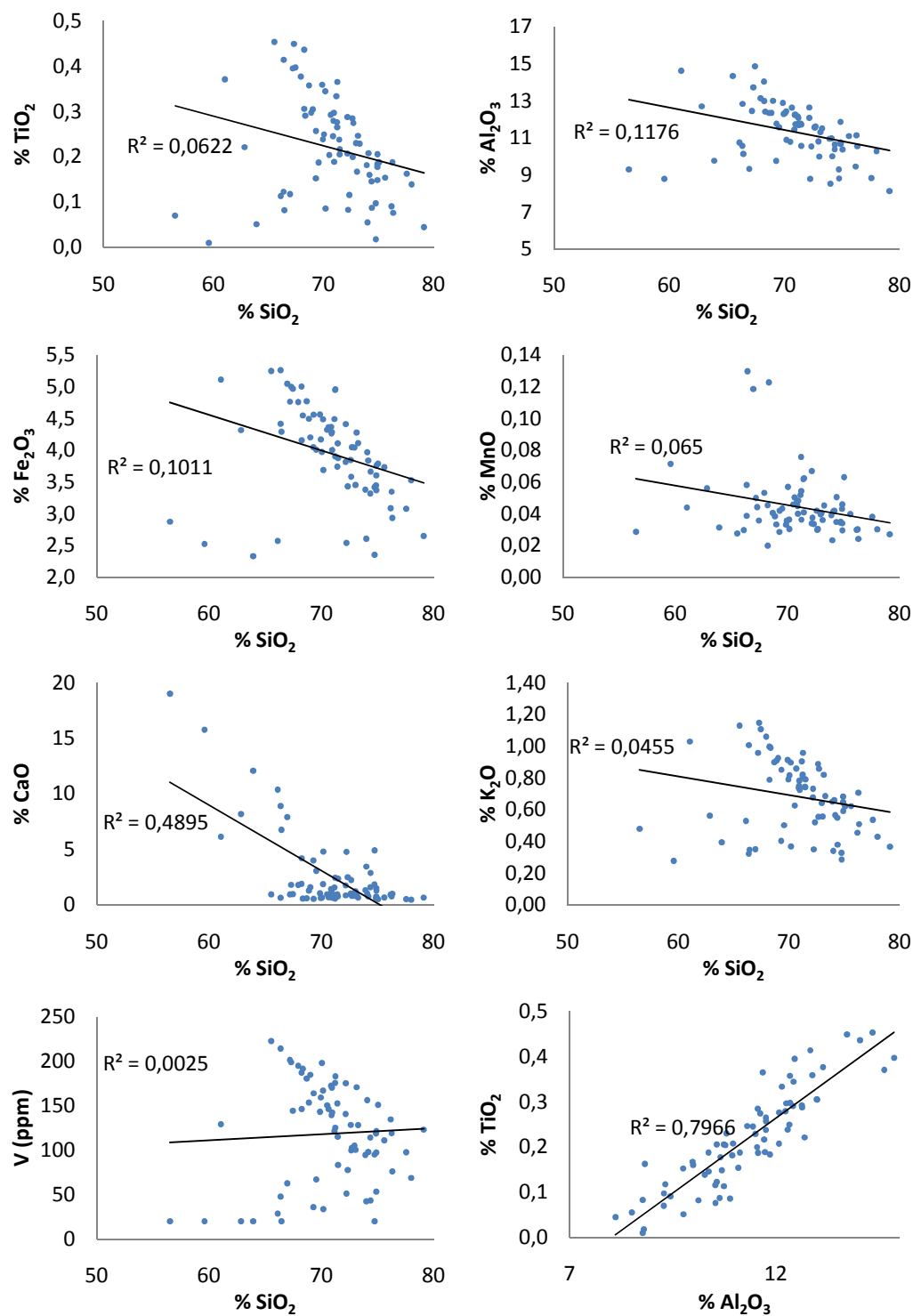


Figura A24. Diagramas de dispersión del pozo 3 (continuación).

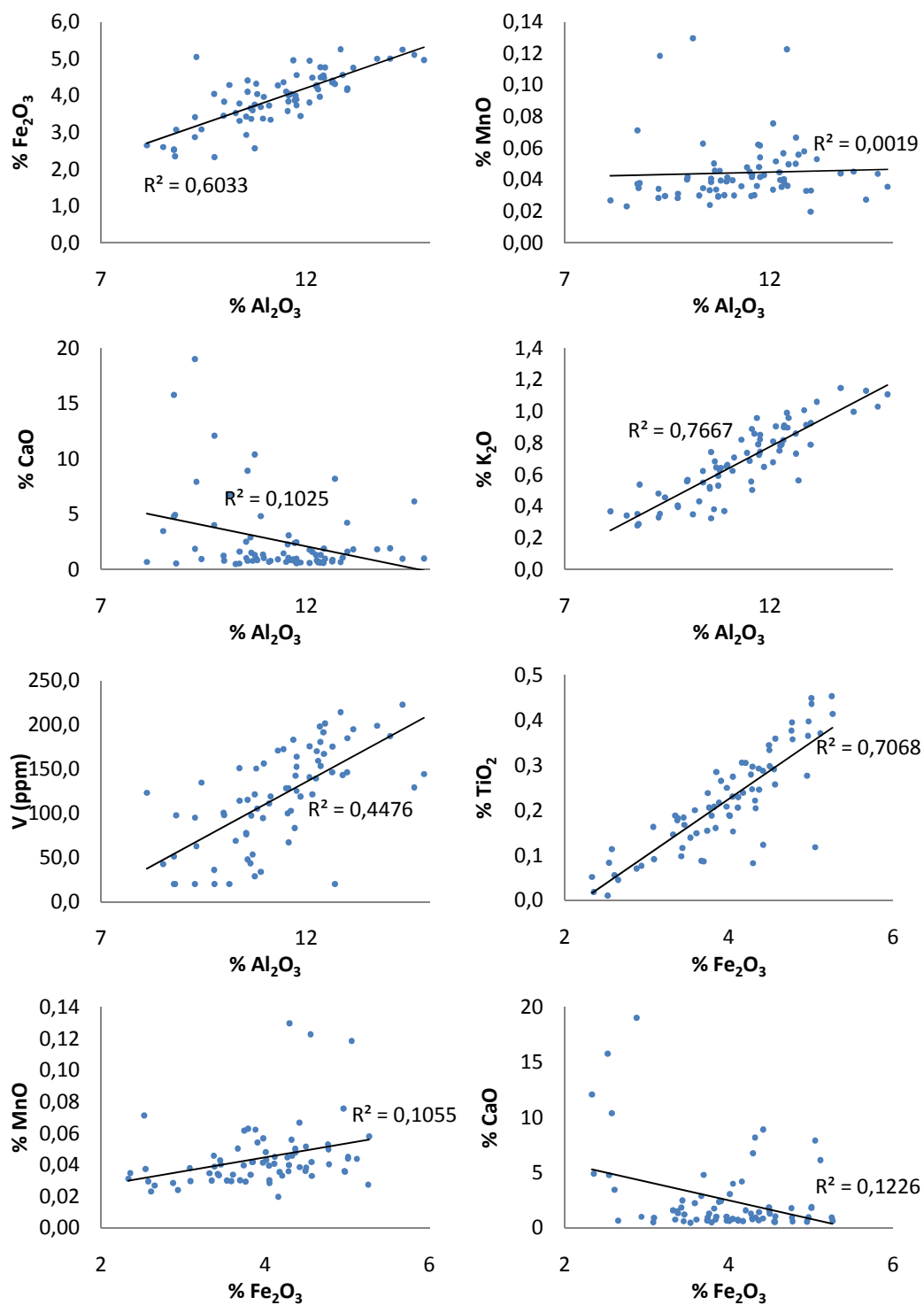


Figura A24. Diagramas de dispersión del pozo 3 (continuación).

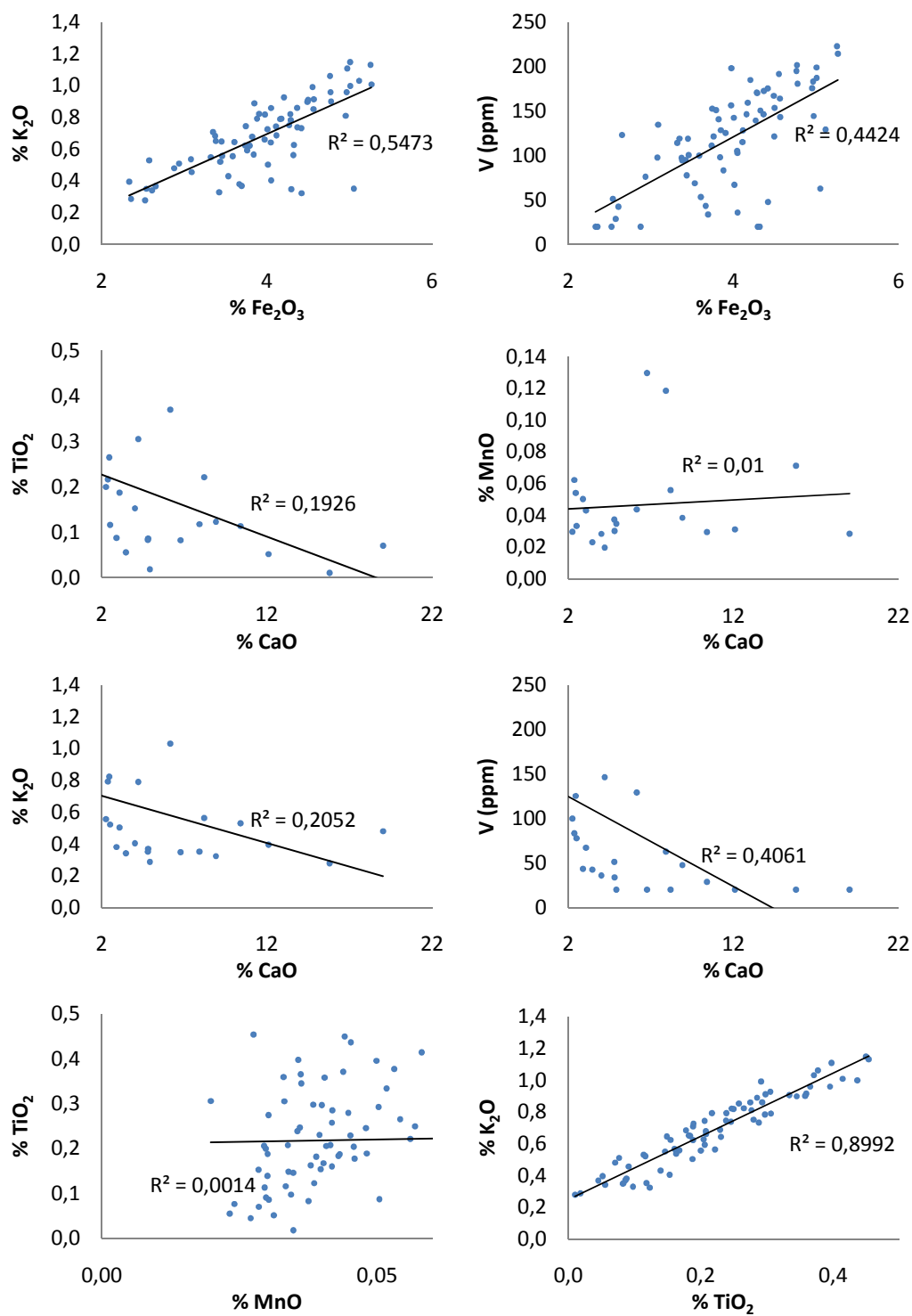


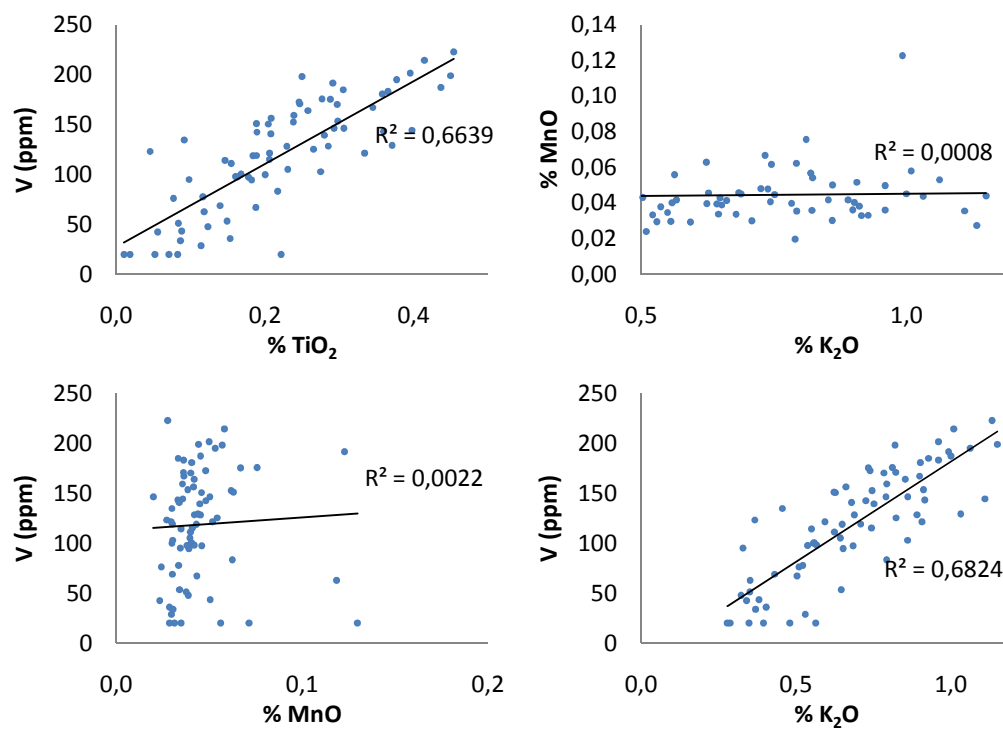
Figura A24. Diagramas de dispersión del pozo 3 (continuación).

Figura A25. Diagramas de dispersión del pozo 6.

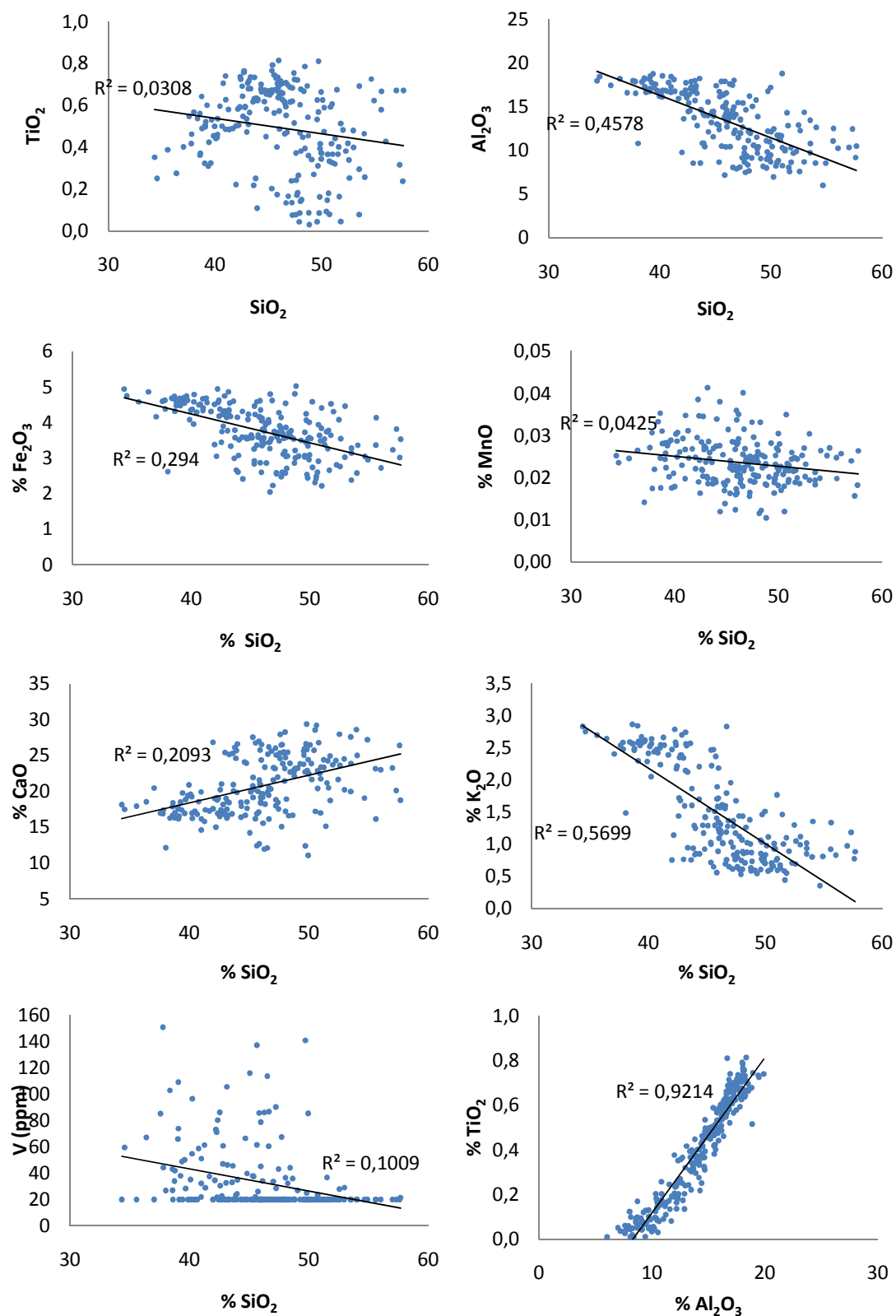


Figura A25. Diagramas de dispersión del pozo 6 (continuación).

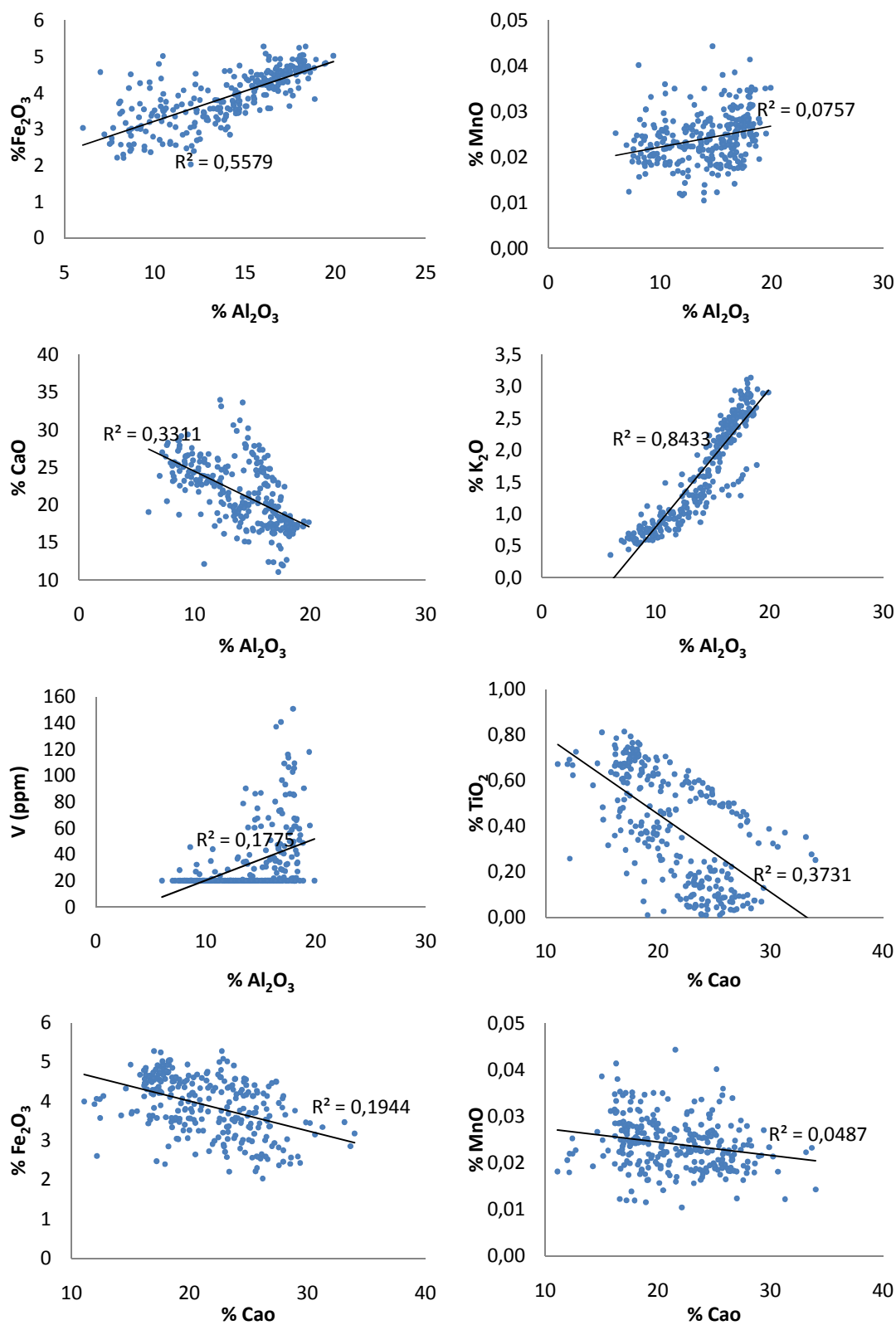
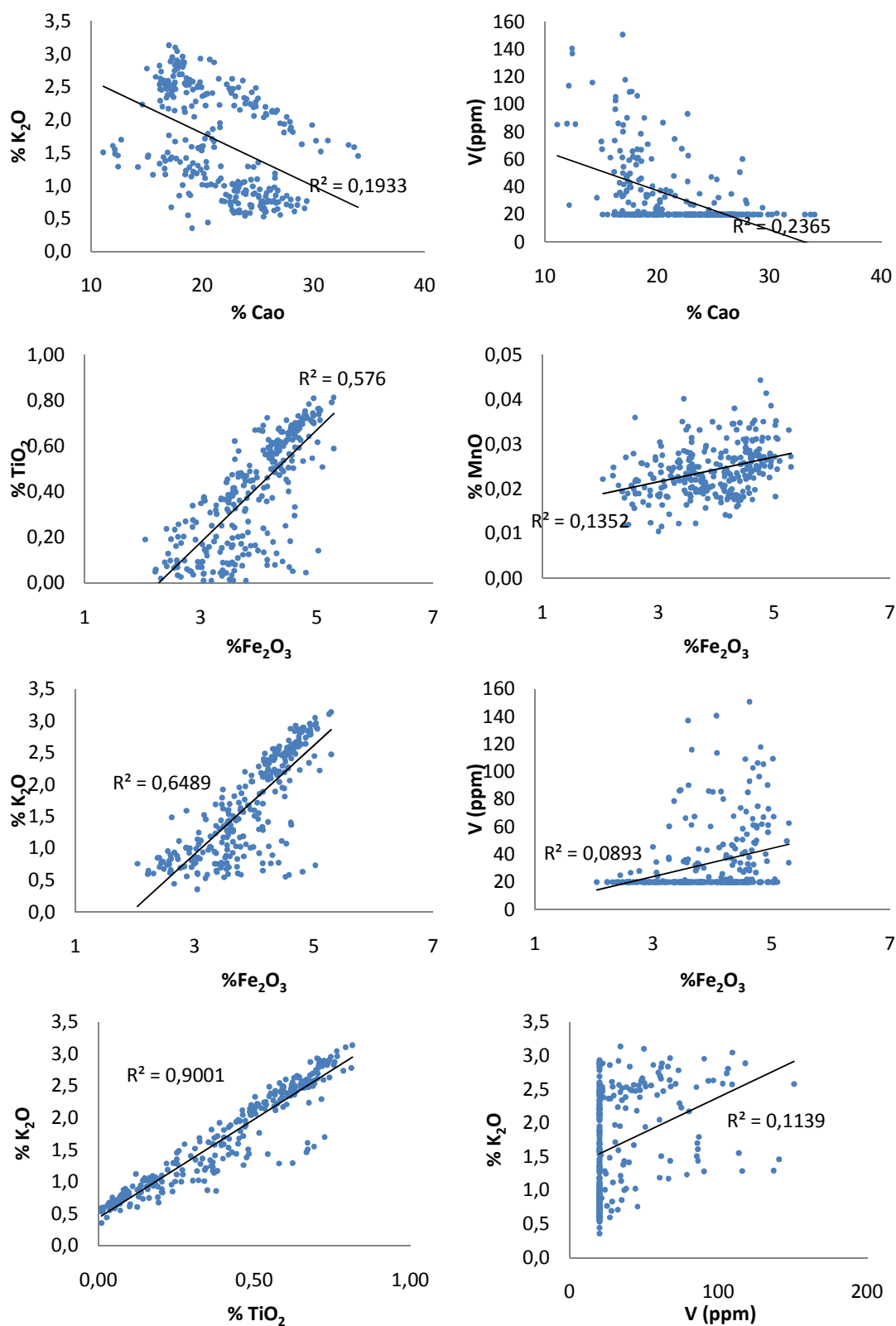


Figura A25. Diagramas de dispersión del pozo 6 (continuación).



APENDICE 5. COEFICIENTES DE LAS FUNCIONES DISCRIMINANTES CONSIDERADOS EN EL CAPITULO 6.

POZO 1

Variables químicas		
Variables	1	2
SiO₂	-4,05010	2,56541
TiO₂	1,98774	1,19960
Al₂O₃	-1,45759	-0,15789
Fe₂O₃	-1,12457	0,95474
MnO	-0,16662	0,50499
CaO	-3,94898	1,91393
K₂O	-0,91324	-1,15333
V	-1,06371	0,47493

Tabla A16. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químicas en el pozo 1.

Variables Radiométricas		
Variables	1	2
F1	0,11619	1,10175
²¹⁴ Bi	-0,675725	-0,626269
²¹² Bi	0,683982	0,167098
F2	2,50663	-1,03891
²¹⁴ Bi	-0,34085	-0,410792
F3	-0,389487	1,37946
⁴⁰ K	-1,22047	0,241166
F4	-0,524015	-0,0387046
²¹⁴ B	0,929942	-0,550719
F5	0,481095	0,389991
²⁰⁸ Tl	-0,750444	-0,0325945

Tabla A17. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades radiométricas en el pozo 1.

Variables químico-radiométricos		
Variables	1	2
F1	1,17455	0,0826394
²¹⁴ Bi	-1,31496	0,447558
²¹² Bi	0,332991	-0,242086
F2	1,11984	3,77267
²¹⁴ Bi	-1,59664	-1,31441
F3	1,75626	-1,59733
⁴⁰ K	-0,438901	-0,986754
F4	0,0254801	-0,813218
²¹⁴ B	-1,20242	1,33285
F5	0,764315	0,409323
²⁰⁸ Tl	-0,918855	-0,487116
SiO ₂	-1,53707	-0,631661
TiO ₂	3,48573	-2,00582
Al ₂ O ₃	-3,22825	0,319841
Fe ₂ O ₃	0,856653	0,542708
MnO	-0,248135	0,192587
CaO	-1,91592	-0,886459
K ₂ O	-0,44518	-0,110782
V	-1,26108	0,83094

Tabla A18. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químicas-radiométricas en el pozo 1.

POZO 3.

Variables químicas			
Variables	1	2	3
SiO ₂	1,19533	2,33649	0,344576
TiO ₂	-1,45767	-0,476287	0,187286
Al ₂ O ₃	-0,132411	1,05046	1,08763
Fe ₂ O ₃	0,352306	-0,345162	-0,60192
MnO	-0,165947	0,377531	0,975135
CaO	0,248133	1,57974	0,134765
K ₂ O	2,17063	1,23533	-1,10639
V	0,53145	-0,39714	0,60567

Tabla A19. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químicas en el pozo 3.

Variables radiométricas

Variables	1	2	3
F1	-0,385301	-0,155975	-0,116197
²¹⁴ Bi	0,407583	-0,0074689	-0,362409
²¹² Bi	0,287793	0,369874	-0,543323
F2	-0,232379	-0,641998	0,045239
²¹⁴ Bi	0,326452	0,088664	-0,17143
F3	0,284491	0,270863	0,661089
⁴⁰ K	0,0282307	0,175462	-0,257703
F4	0,58473	-0,509037	-0,077041
²¹⁴ B	-1,21365	-0,8227	-0,150634
F5	-0,176158	0,0664625	0,324791
²⁰⁸ Tl	0,169883	0,0317588	0,487959

Tabla A20. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades radiométricas en el pozo 3.

Variables químicas-radiométricas

Variables	1	2	3
F1	-0,0510113	0,315346	0,924318
²¹⁴ Bi	0,186239	0,139663	-0,698053
²¹² Bi	0,217897	-0,172989	-0,907261
F2	-0,290943	0,363509	0,49369
²¹⁴ Bi	-0,128301	-0,29514	0,486434
F3	0,251065	-0,333175	-0,559299
⁴⁰ K	-0,0205057	-0,105198	0,22319
F4	-0,455526	-0,272149	-0,001363
²¹⁴ B	0,26989	1,56795	0,53797
F5	0,288741	0,187423	-0,232693
²⁰⁸ Tl	-0,180072	-0,614338	-0,126163
SiO₂	-1,24034	0,981505	-0,768842
TiO₂	0,124908	-2,21016	1,9872
Al₂O₃	0,0962938	0,318023	-1,29772
Fe₂O₃	-0,000984372	0,255277	-0,011787
MnO	0,164717	0,132845	-0,525164
CaO	-0,433535	0,0921891	-0,491499
K₂O	-1,15749	2,03856	-1,02501
V	-0,614908	-0,0118563	-0,032602

Tabla A21. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químico-radiométricas en el pozo 3.

POZO 6.

Variables químicas

Variables	1	2	3
SiO ₂	0,14061	-0,05216	0,49484
TiO ₂	-0,92981	-0,78576	-0,35458
Al ₂ O ₃	-0,03342	-0,36927	0,78913
Fe ₂ O ₃	0,39428	-0,25748	-0,87424
MnO	0,04331	0,04068	-0,48920
CaO	0,40201	-1,24073	0,42264
K ₂ O	-0,01238	0,48536	0,42183
V	0,03570	0,01414	0,37885

Tabla A22. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químicas en el pozo 6

Variables radiométricas

Variables	1	2	3
F1	0,502729	0,422562	-0,036081
²¹⁴ Bi	-0,151537	0,0933115	-1,06716
²¹² Bi	0,35134	0,315233	-0,490984
F2	-0,0651272	0,487645	0,166093
²¹⁴ Bi	0,159632	-0,869366	-0,557725
F3	-0,0260469	0,161193	0,993599
⁴⁰ K	0,112672	-0,0359979	-0,056676
F4	0,544859	-0,975285	0,492334
²¹⁴ B	-0,0611432	0,364466	0,323861
F5	-0,0767713	0,238003	-0,266586
²⁰⁸ Tl	-0,0585433	0,387063	0,127194

Tabla A23. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades radiométricas en el pozo 6.

Variables químico-radiométricas.

Variables	1	2	3
F1	-0,404875	-0,11925	-0,394675
²¹⁴ Bi	0,204639	-0,0741934	0,657469
²¹² Bi	-0,370666	-0,0370263	-0,299283
F2	0,190834	0,0898404	0,365533
²¹⁴ Bi	-0,148219	-0,126698	0,390641
F3	0,165663	0,185903	-0,052556
⁴⁰ K	-0,0771617	0,0773365	-0,201532
F4	-0,591867	-0,150372	0,166594
²¹⁴ B	0,251662	0,00223486	-0,149321
F5	0,10311	0,0763136	0,375198
²⁰⁸ Tl	0,120818	-0,00153692	0,102401
% SiO₂	0,254762	-0,0955107	0,206831
% TiO₂	-1,09389	-0,543816	-0,243507
% Al₂O₃	0,059384	-0,182349	0,524512
% Fe₂O₃	0,285452	-0,337978	-0,727253
% MnO	0,000748706	0,00687192	-0,306247
% CaO	0,0919853	-1,34159	0,351586
% K₂O	0,558868	0,365341	-0,183008
V (ppm)	0,195813	-0,0154393	0,113105

Tabla A24. Coeficientes de las funciones discriminantes empleados para la distinción de unidades químico-radiométricas en el pozo 6.

APÉNDICE 6. VALORES DE PRUEBA Z, CONSIDERADOS EN LOS CAPITULOS 6 Y 7.

Los valores resaltados en rojo y verde respectivamente se presentan los valores mayores de $Z_{\alpha=0,01}$ y $Z_{\alpha=0,05}$. Debajo de cada tabla se presentan los valores de Z dependiendo de los grados de libertad (grados de libertad = N° de muestras -2)

Tabla A25. Valores de la prueba Z. aplicada a las variables del pozo 1 y 3.

Pozo	1		3		Z
Variable	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
SiO ₂	67,3	9,58	70,9	4,16	5,908
TiO ₂	0,330	0,264	0,219	0,109	1,125
Al ₂ O ₃	11,7	4,26	11,3	1,47	0,880
Fe ₂ O ₃	4,17	2,12	3,95	0,732	0,799
MnO	0,034	0,022	0,044	0,020	0,346
CaO	4,55	7,73	2,60	3,50	3,615
K ₂ O	0,874	0,625	0,684	0,229	1,261
V	136,4	101,2	118,6	55,5	9,003
F1	1,15	0,110	1,12	0,065	0,460
²¹⁴ Bi	1,000	0,086	0,962	0,064	0,635
²¹² Bi	0,967	0,102	0,984	0,062	0,267
F2	1,512	0,102	1,453	0,073	0,906
²¹⁴ Bi	0,689	0,065	0,704	0,070	0,271
F3	0,535	0,043	0,537	0,027	0,042
⁴⁰ K	0,455	0,034	0,447	0,023	0,212
F4	0,335	0,048	0,324	0,027	0,275
²¹⁴ B	0,284	0,030	0,305	0,037	0,552
F5	0,430	0,032	0,419	0,033	0,264
²⁰⁸ Tl	0,179	0,017	0,172	0,024	0,241
n	32		73		105

$Z_{\alpha=0,01} > 2,369$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,665$ (103 grados de libertad).

Tabla A26. Valores de la prueba Z. aplicada a los pozos "Barquisimeto" y "Cabudare"

Pozo	"Barquisimeto"		"Cabudare"		Z
Variable	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
SiO ₂	70,9	4,16	47,1	4,72	87,78
TiO ₂	0,219	0,109	0,403	0,238	3,81
Al ₂ O ₃	11,3	1,47	14,1	3,29	15,47
Fe ₂ O ₃	3,95	0,732	3,91	0,731	0,383
MnO	0,044	0,020	0,024	0,006	1,187
CaO	2,60	3,50	21,4	4,26	75,11
K ₂ O	0,684	0,229	1,68	0,776	13,03
V	118,6	55,5	33,3	24,9	92,67
F1	1,12	0,065	1,19	0,117	1,84
²¹⁴ Bi	0,962	0,064	1,01	0,090	1,280
²¹² Bi	0,984	0,062	1,02	0,093	1,105
F2	1,45	0,073	1,54	0,104	2,307
²¹⁴ Bi	0,704	0,070	0,743	0,094	1,103
F3	0,537	0,027	0,573	0,051	1,559
⁴⁰ K	0,447	0,023	0,463	0,035	0,773
F4	0,324	0,027	0,362	0,061	1,604
²¹⁴ Bi	0,305	0,037	0,360	0,038	2,159
F5	0,419	0,033	0,435	0,030	0,661
²⁰⁸ Tl	0,172	0,024	0,187	0,016	0,761
n	73		286		359

$Z_{\alpha=0,01} > 2,325$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,645$ (359 grados de libertad).

Tabla A27. Valores de la prueba Z. las unidades 3 y 4 de “Barquisimeto”.

Pozo	Barquisimeto 4		Barquisimeto 3		Z
Variable	Promedio	Desviacion estandar	Promedio	Desviacion estandar	
SiO ₂	68,3	5,43	72,3	3,24	6,006
TiO ₂	0,103	0,060	0,241	0,110	1,563
Al ₂ O ₃	10,1	1,18	11,6	1,48	4,460
Fe ₂ O ₃	3,43	0,86	3,91	0,649	1,753
MnO	0,048	0,031	0,039	0,011	0,180
CaO	7,12	4,88	1,46	0,80	10,048
K ₂ O	0,399	0,092	0,768	0,205	3,192
V	42,8	25,6	130,4	38,6	50,606
F1	1,06	0,035	1,14	0,061	1,058
²¹⁴ Bi	0,893	0,035	0,974	0,054	1,263
²¹² Bi	1,002	0,032	0,991	0,072	0,158
F2	1,388	0,058	1,474	0,069	1,108
²¹⁴ Bi	0,721	0,058	0,711	0,069	0,131
F3	0,522	0,017	0,540	0,027	0,405
⁴⁰ K	0,432	0,016	0,448	0,024	0,371
F4	0,291	0,017	0,329	0,024	0,859
²¹⁴ B	0,331	0,024	0,321	0,037	0,197
F5	0,412	0,022	0,429	0,022	0,365
²⁰⁸ Tl	0,170	0,016	0,170	0,036	0,001
n	17		26		43

$Z_{\alpha=0,01} > 2,423$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,685$ (41 grados de libertad).

Tabla A28. Valores de la prueba Z. las unidades 2 y 3 de “Barquisimeto”.

Pozo	Barquisimeto 2		Barquisimeto 3		Z
Variable	Promedio	Desviacion estandar	Promedio	Desviacion estandar	
SiO ₂	70,8	2,62	72,3	3,24	2,896
TiO ₂	0,286	0,085	0,241	0,110	0,477
Al ₂ O ₃	11,8	1,07	11,6	1,48	0,509
Fe ₂ O ₃	4,39	0,45	3,91	0,649	2,137
MnO	0,043	0,008	0,039	0,011	0,111
CaO	0,91	0,24	1,46	0,80	2,596
K ₂ O	0,797	0,158	0,768	0,205	0,230
V	158,2	37,2	130,4	38,6	14,790
F1	1,15	0,054	1,14	0,061	0,244
²¹⁴ Bi	0,998	0,056	0,974	0,054	0,324
²¹² Bi	0,968	0,067	0,991	0,072	0,280
F2	1,478	0,068	1,474	0,069	0,053
²¹⁴ Bi	0,698	0,093	0,711	0,069	0,141
F3	0,542	0,034	0,540	0,027	0,033
⁴⁰ K	0,458	0,021	0,448	0,024	0,200
F4	0,340	0,014	0,329	0,024	0,277
²¹⁴ B	0,277	0,022	0,321	0,037	0,847
F5	0,411	0,053	0,429	0,022	0,285
²⁰⁸ Tl	0,176	0,009	0,170	0,036	0,135
n	18		26		44

$Z_{\alpha=0,01} > 2,425$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,688$ (42 grados de libertad).

Tabla A29. Valores de la prueba Z, las unidades 3 y 4 de “Cabudare”.

Pozo	Cabudare 4		Cabudare 3		Z
parametro	Promedio	Desviacion estandar	Promedio	Desviacion estandar	
SiO ₂	49,4	3,37	48,1	3,62	5,164
TiO ₂	0,144	0,110	0,570	0,145	9,01
Al ₂ O ₃	10,6	2,16	16,3	1,82	30,28
Fe ₂ O ₃	3,37	0,644	4,17	0,589	7,724
MnO	0,023	0,005	0,025	0,006	0,213
CaO	23,78	3,00	17,8	2,08	28,1
K ₂ O	0,876	0,261	2,11	0,601	14,3
V	22,4	12,3	44,4	30,3	36,2
F1	1,07	0,062	1,27	0,078	5,869
²¹⁴ Bi	0,926	0,055	1,07	0,073	4,153
²¹² Bi	0,942	0,066	1,07	0,072	3,649
F2	1,45	0,054	1,61	0,081	4,800
²¹⁴ Bi	0,658	0,050	0,788	0,074	3,950
F3	0,523	0,025	0,605	0,040	3,459
⁴⁰ K	0,430	0,021	0,486	0,025	2,775
F4	0,299	0,025	0,402	0,044	4,204
²¹⁴ B	0,336	0,031	0,373	0,032	1,578
F5	0,409	0,020	0,454	0,024	2,284
²⁰⁸ Tl	0,177	0,012	0,195	0,014	1,145
N	107		120		227

$Z_{\alpha=0,01} > 2,325$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,645$ (225 grados de libertad).

Tabla A30. Valores de la prueba Z, las unidades 2 y 3 de “Cabudare”.

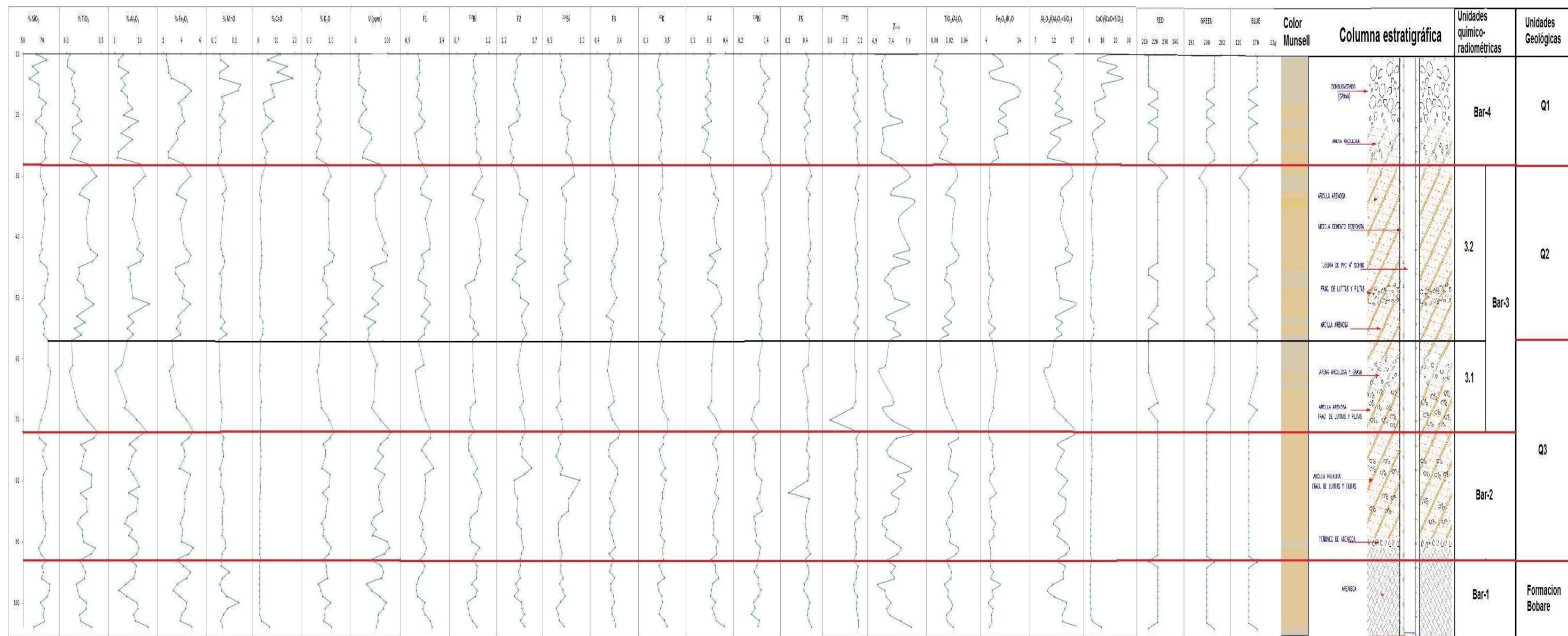
Pozo	Cabudare 2		Cabudare 3		Z
parametro	Promedio	Desviacion estándar	Promedio	Desviacion estándar	
SiO ₂	41,7	2,53	48,1	3,62	20,59
TiO ₂	0,589	0,105	0,570	0,145	0,289
Al ₂ O ₃	16,5	1,18	16,3	1,82	1,066
Fe ₂ O ₃	4,60	0,350	4,17	0,589	3,588
MnO	0,027	0,005	0,025	0,006	0,140
CaO	22,57	3,03	17,8	2,08	15,16
K ₂ O	2,445	0,355	2,11	0,601	2,765
V	33,3	23,1	44,4	30,3	11,84
F1	1,25	0,061	1,27	0,078	0,370
²¹⁴ Bi	1,030	0,055	1,07	0,073	0,773
²¹² Bi	1,097	0,043	1,07	0,072	0,656
F2	1,57	0,090	1,61	0,081	0,702
²¹⁴ Bi	0,824	0,053	0,788	0,074	0,777
F3	0,609	0,032	0,605	0,040	0,095
⁴⁰ K	0,485	0,022	0,486	0,025	0,011
F4	0,406	0,035	0,402	0,044	0,110
²¹⁴ B	0,384	0,029	0,373	0,032	0,334
F5	0,445	0,020	0,454	0,024	0,322
²⁰⁸ Tl	0,192	0,013	0,195	0,014	0,107
n	37		120		157

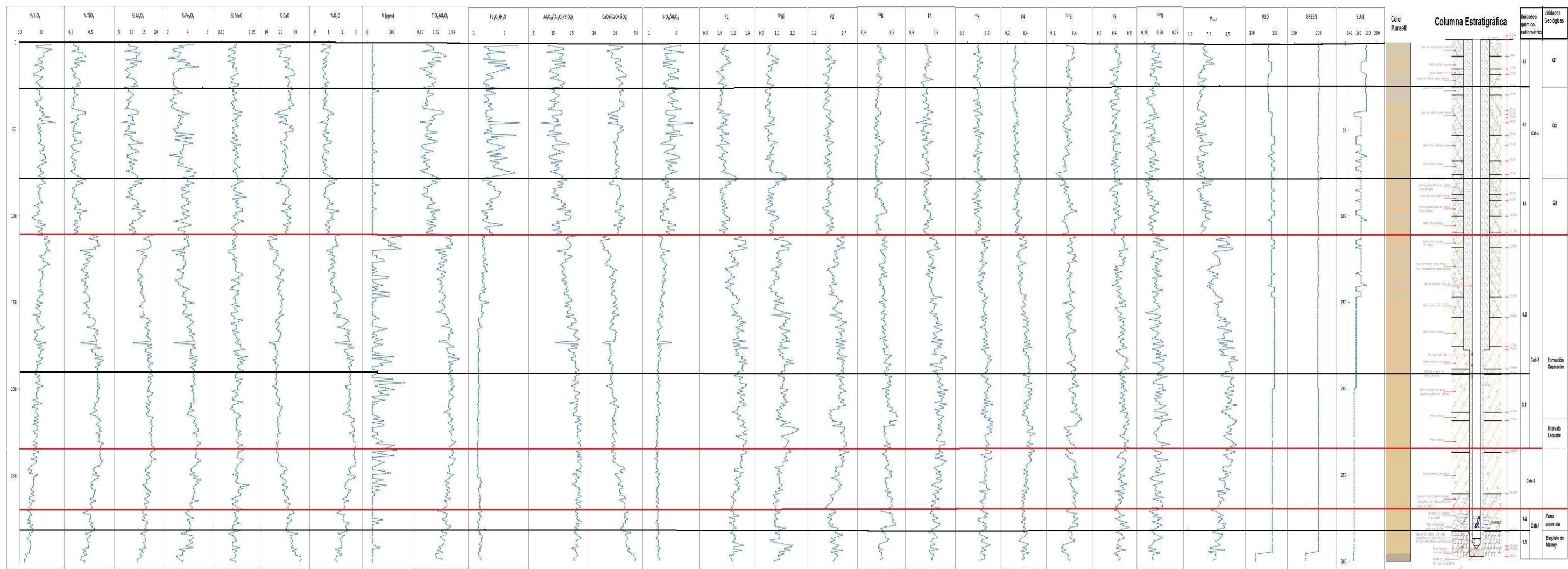
$Z_{\alpha=0,01} > 2,325$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,645$ (155 grados de libertad).

Tabla A31. Valores de la prueba Z, las unidades 1 y 2 de “Cabudare”.

Pozo	Cabudare 2		Cabudare 1		Z
parametro	Promedio	Desviacion estandar	Promedio	Desviacion estandar	
SiO ₂	41,7	2,53	38,9	2,31	6,517
TiO ₂	0,589	0,105	0,431	0,095	1,864
Al ₂ O ₃	16,5	1,18	14,9	1,25	5,438
Fe ₂ O ₃	4,60	0,350	3,89	0,491	3,997
MnO	0,027	0,005	0,022	0,005	0,270
CaO	22,57	3,03	28,0	3,11	11,525
K ₂ O	2,445	0,355	1,97	0,304	3,126
V	33,3	23,1	25,0	11,7	7,763
F1	1,25	0,061	1,21	0,046	0,755
²¹⁴ Bi	1,030	0,055	1,03	0,075	0,020
²¹² Bi	1,097	0,043	1,02	0,091	1,078
F2	1,57	0,090	1,54	0,066	0,415
²¹⁴ Bi	0,824	0,053	0,775	0,098	0,635
F3	0,609	0,032	0,580	0,026	0,626
⁴⁰ K	0,485	0,022	0,469	0,025	0,391
F4	0,406	0,035	0,385	0,027	0,446
²¹⁴ B	0,384	0,029	0,356	0,046	0,522
F5	0,445	0,020	0,439	0,026	0,150
²⁰⁸ Tl	0,192	0,013	0,185	0,014	0,245
n	37		22		59

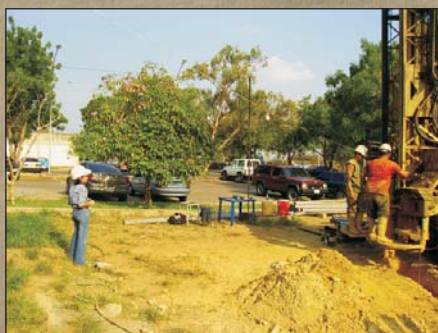
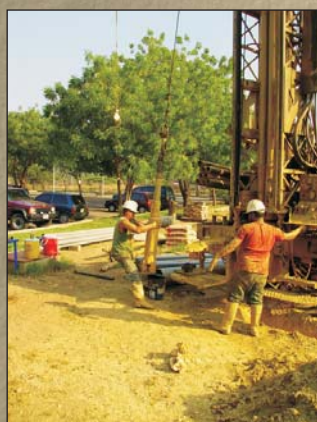
$Z_{\alpha=0,01} > 2,390$ y $Z_{\alpha=0,05} > 1,671$ (57 grados de libertad).







Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto, Estado Lara



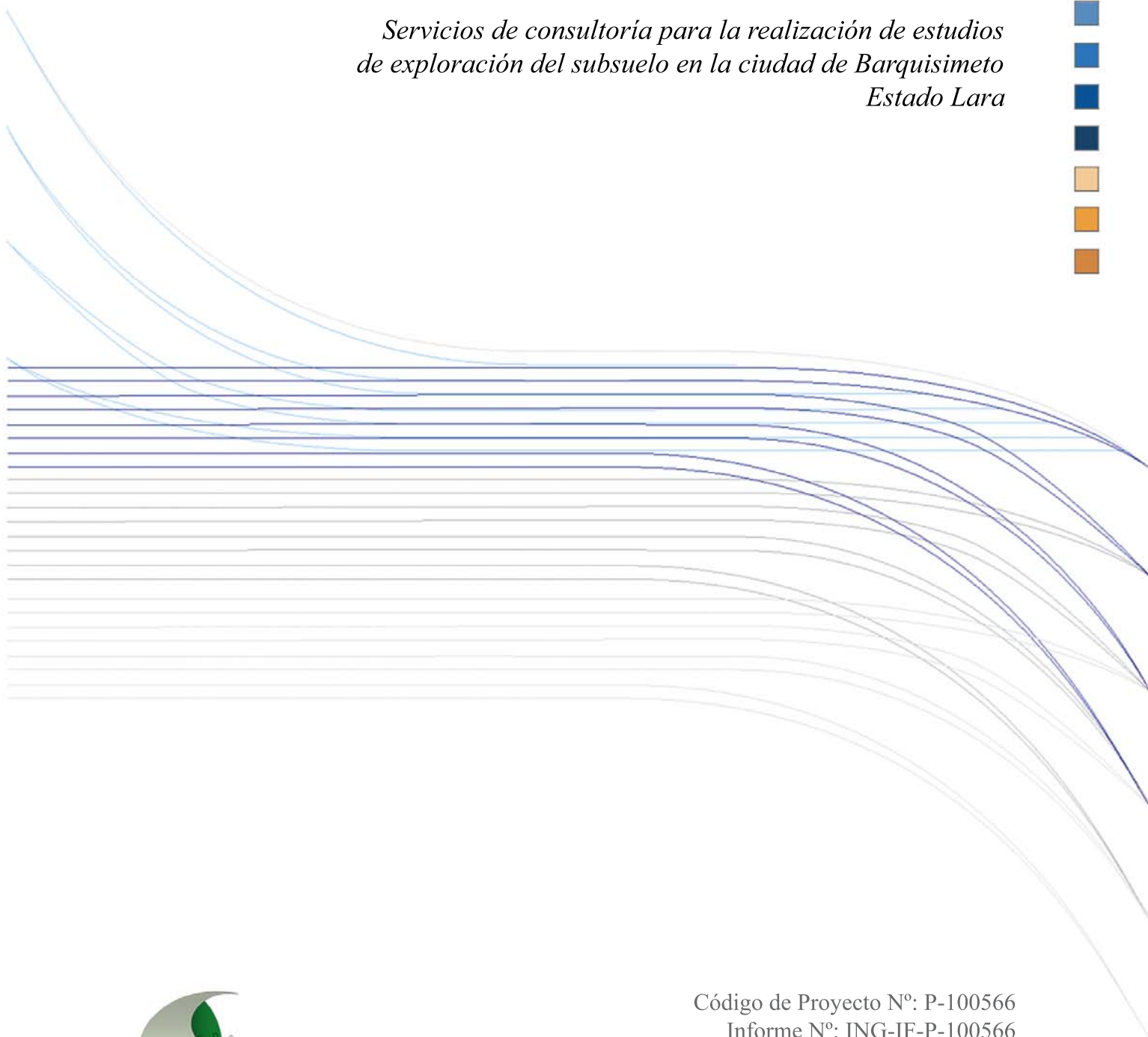
Julio de 2.006

Informe Barquisimeto
Proyecto N°: P-100566



INFORME BARQUISIMETO

*Servicios de consultoría para la realización de estudios
de exploración del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto
Estado Lara*



Código de Proyecto N°: P-100566

Informe N°: ING-IF-P-100566

Revisión 0

Cliente: FUNVISIS

Julio de 2.006

CONTROL DEL DOCUMENTO Y ESTADO DE LA REVISIÓN

Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto.

Cliente: FUNVISIS

Título del Documento: Informe BARQUISIMETO

N° de Proyecto: P-100566

Referencia del Documento: ING-IP-P-100566 - 1 Rev.0

Entrega: 1 Copia impresa y un CD con archivo electrónico

Preparado por: GISCA
Geotecnia e Ingeniería Sísmica
Calle La Guairita, Edificio Los Frailes, PH, Chuao
Caracas 1060, Venezuela
Telf.: 58-212-993.7814 / 7838
Fax: 58-212-993.5512
E-mail: gisca@gisca-ve.com

Control del Documento						
Responsable:		Amancio Pérez				
Fecha:		14 de Julio de 2006				
Rev. N°	Descripción	Destinatario Principal	Formato	Rev.	Apr.	Cliente
A	Revisión Interna	Documento Interno	.doc	EP		
0	El Cliente	FUNVISIS	.pdf	EP	PM	

Copia	Emitido para	Formato	Fecha	Notas
1	Archivo GISCA	Original	14 de Julio de 2006	
2	FUNVISIS	Original	14 de Julio de 2006	

Revisado por: A. Pérez (AP)
Aprobado por: P. Marinero (PM)

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción general del proyecto correspondiente a UCLA - Barquisimeto	1
1.2 Descripción del área.....	1
1.3 Alcance de las actividades	5
1.4 Objetivo del informe	5
2 GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA EN ESTUDIO	6
3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO Y EQUIPOS UTILIZADOS.....	11
3.1 Pozos para geofísica.....	11
3.1.1 <i>Ejecución de la perforación.....</i>	<i>12</i>
3.1.2 <i>Litología inferida de las perforaciones de pozos geofísicos.....</i>	<i>16</i>
3.1.3 <i>Identificación de la roca fresca</i>	<i>17</i>
3.1.4 <i>Cementación del tubo de PVC de 4" para la instalación del equipo de medición.....</i>	<i>18</i>
3.2 Perforación geotécnica.....	21
3.1.1 <i>Ejecución de la perforación y muestreo</i>	<i>21</i>
3.1.2 <i>Evaluación del nivel freático</i>	<i>22</i>
3.1.3 <i>Descripción del perfil geotécnico idealizado e interpretado a partir de los ensayos de campo.....</i>	<i>23</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 - Ubicación relativa del área en estudio
- Figura 2 - Ubicación general de los pozos
- Figura 3 - Vista hacia el sur del área en estudio, ejecución del Pozo P-2
- Figura 4 - Vista hacia el norte del área en estudio.
- Figura 5 - Vista de la unidades Cuaternarias, $Q_2 - Q_3$, en la avenida Nectario Maria (Rivereña) sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio.
- Figura 6 - Vista panorámica de las unidades Cuaternarias, $Q_2 - Q_3$, en la avenida Nectario Maria (Rivereña) sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio.
- Figura 7 - Fotomosaico en detalle de las unidades Cuaternarias, $Q_2 - Q_3$, donde se muestra el predominio de los conglomerados de esta secuencia, ubicado a lo largo de la avenida Nectario Maria (Rivereña) sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio.
- Figura 8 - Fotomosaico en detalle de las unidades Cretácicas, formación Barquisimeto, donde se muestra el contacto discordante con las unidades Cuaternarias, ubicado a lo largo de la avenida Nectario Maria (Rivereña), sector Puente Macuto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio.
- Figura 9 - Geología general del área en estudio, tomado y modificado de Hackley et al (2005).
- Figura 10 - Equipo utilizado en la perforación de los pozos geofísicos
- Figura 11 - Esquema general de la perforación P-1 y los Pozos P-2 y P-3A.
- Figura 12 - Depósito para la circulación del fluido durante la perforación.
- Figura 13 - Vista de la fosa de lodo, canal de circulación y ubicación de equipos
- Figura 14 - Vista general del proceso de entubado.
- Figura 15 - Detalle de colocación del centralizador.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	-	Resumen de Unidades Litoestratigráficas
Tabla 2	-	Profundidad del nivel freático

FUNVISIS

Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración
del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto.
Estado Lara, Venezuela.

Documento:

Informe BARQUISIMETO

Informe N°:

ING-IP-P-100566 Rev. 0

Fecha:

Julio de 2006

ANEXOS

ANEXO A - Registros de sondeos para los pozos geofísicos

ANEXO B - Registro del sondeo geotécnico

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general del proyecto correspondiente a UCLA - Barquisimeto

GISCA atendiendo la solicitud de parte de FUNVISIS para ejecutar la construcción de dos (2) pozos para la instalación de instrumentos de supervisión geofísica y otro pozo para evaluar las características geotécnicas presentes en el subsuelo, realizó en el área correspondiente al Decanato de Ingeniería de la UCLA en Barquisimeto, los trabajos que se describen en el presente informe.

Las perforaciones se ejecutaron en la zona occidental de la Ciudad de Barquisimeto, en el sector Obelisco (ver Figura 1). Específicamente en el Núcleo de la Universidad Centro-occidental “Lisandro Alvarado” (UCLA), Decanato de Ingeniería Civil (DIC); ubicado en la prolongación hacia el norte de la avenida La Salle, entre las avenidas Las Industrias y Antonio Benítez, Municipio Iribarren del estado Lara. Dentro de los terrenos de la UCLA-DIC, en la zona cercana a los Laboratorios de Sanidad Ambiental y el estacionamiento oeste, como se muestra en la Figura 2, dichos trabajos se describen a continuación.

El trabajo de campo consistió en las operaciones necesarias para la construcción de los dos (2) pozos antes mencionados; uno de ellos con el objetivo de alcanzar roca fresca, con una profundidad final de 105 m y el otro hasta 37 metros de profundidad. Para la recuperación de muestras de suelo a ser evaluadas en laboratorio y así poder definir las propiedades geotécnicas, tanto estáticas como dinámicas del perfil de suelos se realizó adicionalmente, una perforación geotécnica para determinar el inicio de la sucesión sedimentaria correspondiente a una roca competente, (91.50 m) por requerimientos del cliente.

1.2 Descripción del área

El área donde se ejecutaron las perforaciones geofísicas y el sondeo geotécnico está dentro de las instalaciones del Decanato de Ingeniería Civil, y cuyas coordenadas UTM son: N: 1.113.340 y E: 459.963. En la Figura 1, se muestra la ubicación relativa del sitio de trabajo para el proyecto de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Barquisimeto.

Dentro de las instalaciones de Decanato de Ingeniería de la UCLA se realizaron tres (3) perforaciones; dos (2) son denominados pozos geofísicos, de profundidades de 37 m y 105 m, y una perforación geotécnica la cual llegó hasta la roca, cuya profundidad alcanzó 91.50 m. Debido a problemas operativos durante la cementación del Pozo P-3, se realizó un cuarto pozo denominado P-3A. Cercano a los pozos, se encuentra una tanquilla de 1.25 m x 0.78 m, perteneciente a FUNVISIS donde tiene instalado equipos de medición (ver Figura 2).

La superficie del terreno presenta una topografía uniforme, con suave pendiente hacia el sureste. La zona donde se realizaron las perforaciones se encuentra en un terreno sin asfaltar, ubicado al oeste del estacionamiento de la UCLA-DIC (ver Figura 2 y 3).

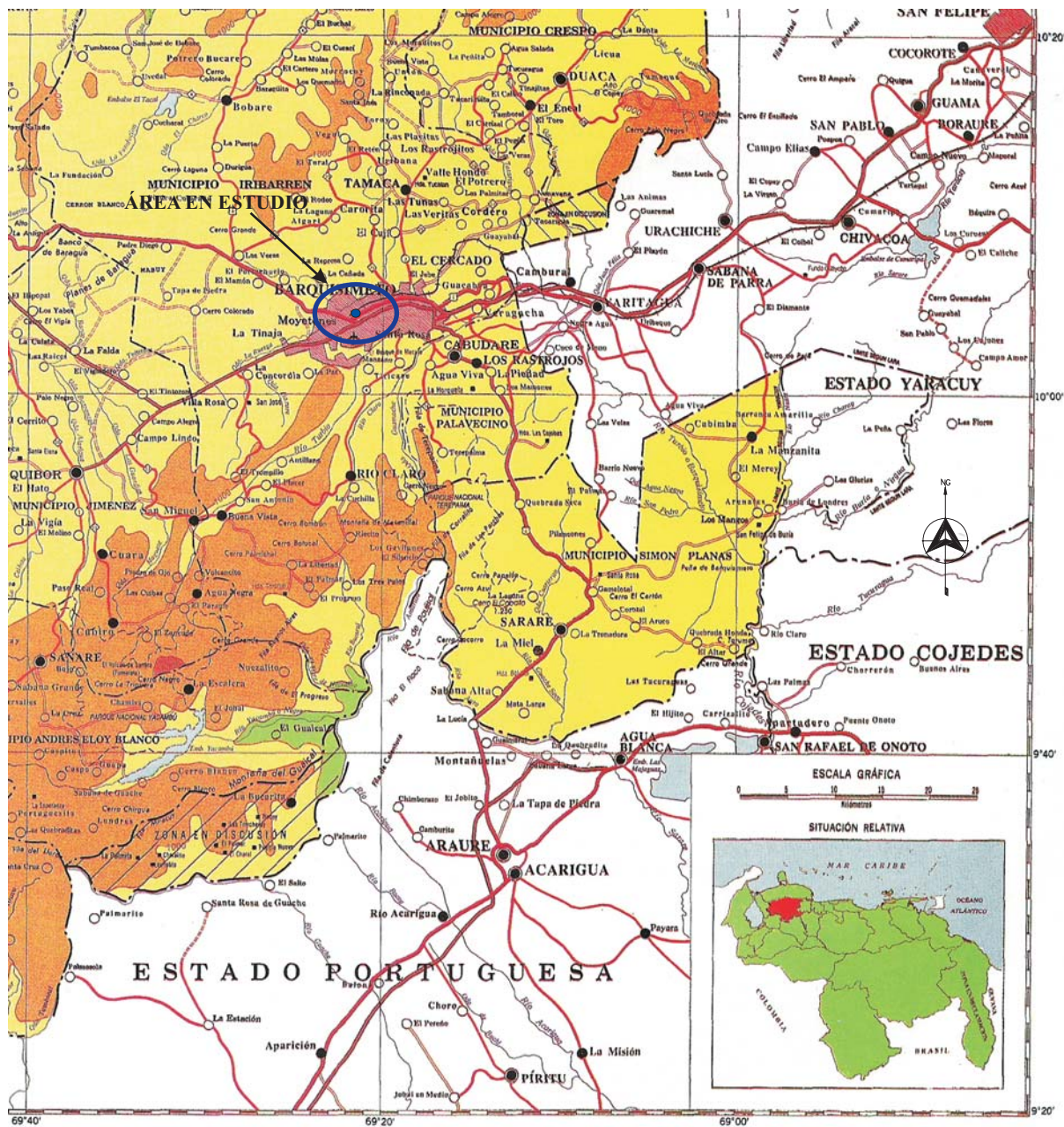
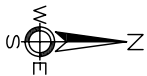
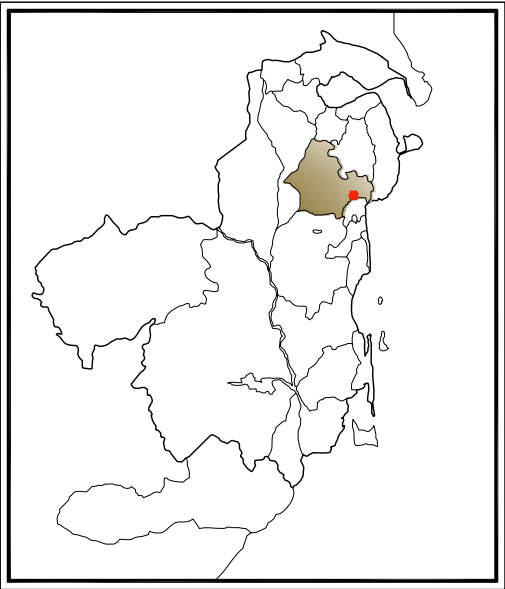
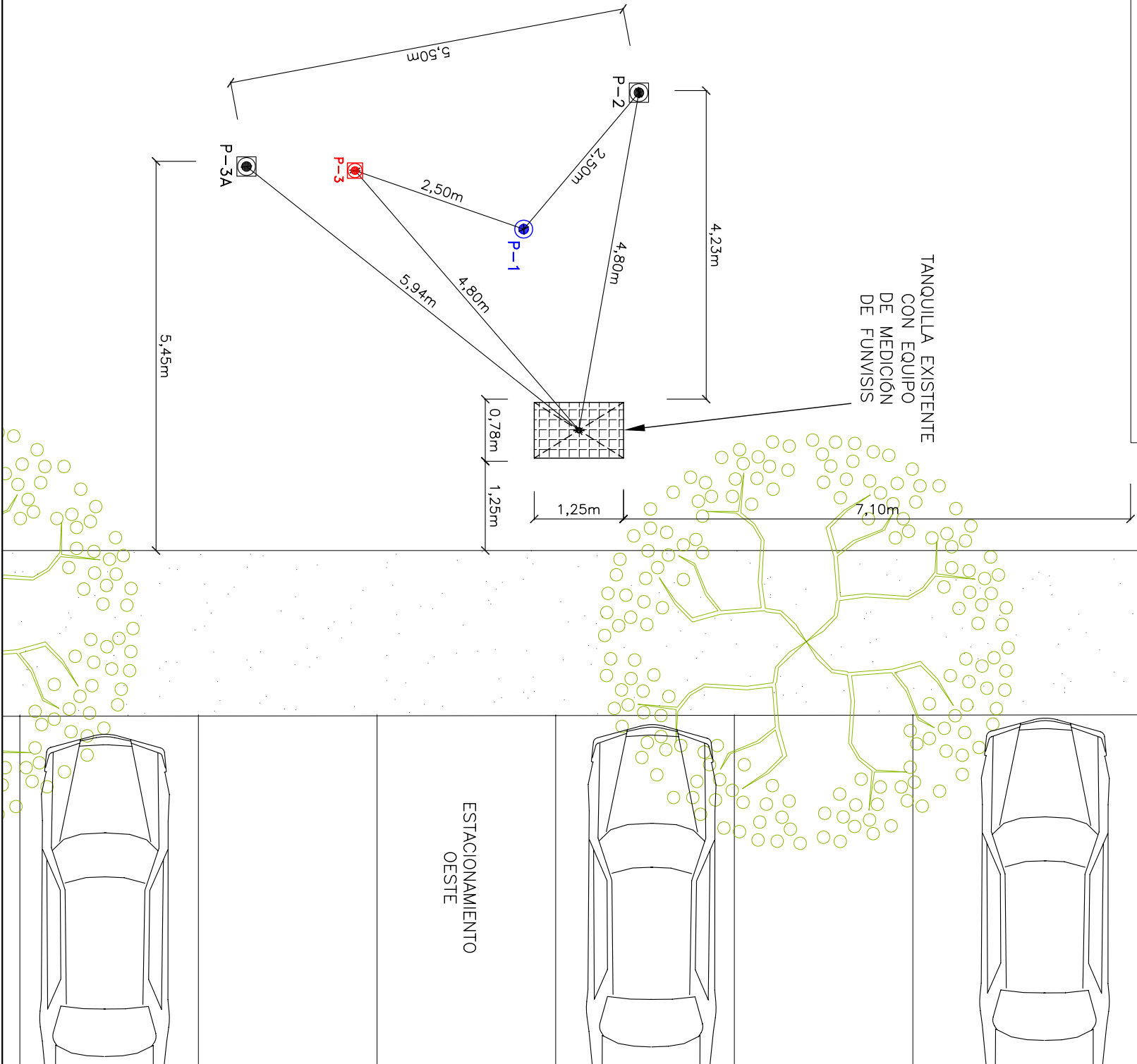


Figura 1. Ubicación relativa del área en estudio

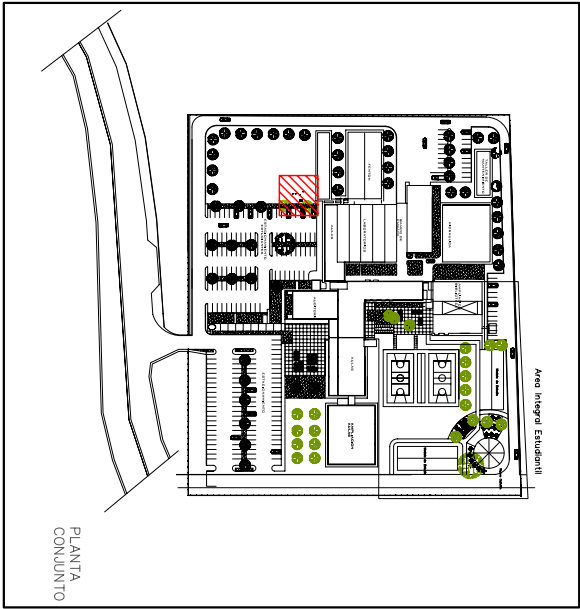


LEYENDA	
	PERFORACIÓN GEOTECNICA
	PERFORACIÓN GEOFISICA
	PERFORACIÓN GEOFISICA (PERDIDA)

NOTA: PLANO SUMINISTRADO POR EL CLIENTE



UBICACIÓN GEOGRÁFICA



UBICACIÓN RELATIVA

Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de barquisimeto, estado Lara

Ubicación de sondeos exploratorios

Diseñado por:	A. PÉREZ	Dibujado por:	J. BASCIANI	Fecha:	JULIO/2006	Figura N°	
Revisado por:	I. BARRIOS	Proyecto N°:	P-100566	Escala:	1:75		2
Aprobado por:	P. MARINARO	Archivo N°:	ING-FIG-P-100566-002-0	Revisión N°	0		

Geotecnia e Ingeniería Sísmica

GISCA

N°	REVISIÓN	FECHA:



Figura 3: Vista hacia el sur del área en estudio, ejecución de la perforación del Pozo P-2



Figura 4: Vista hacia el norte del área en estudio

Los árboles de altura mediana y grande son parte del paisajismo del estacionamiento de la escuela. La localización final de las perforaciones fue realizada considerando un mínimo impacto sobre el aparcamiento y circulación de los vehículos. (véase Figura 4).

1.3 Alcance de las actividades

El alcance de los sondeos geofísicos y geotécnicos fue realizado tomando en cuenta las especificaciones entregadas por FUNVISIS y contempla los siguientes aspectos:

- Ejecución de una perforación geofísica somera de 8 ¾" de diámetro hasta una profundidad que permita realizar mediciones geofísicas hasta unos 28 m profundidad, considerando que el acelerómetro mide 1 m de longitud.
- Instalación de tubo de PVC de 4" con punta cerrada hasta la profundidad final de la perforación geofísica somera, y colocación de una lechada de cemento en el anular entre el terreno y el tubo para garantizar la transmisión de las ondas sísmicas hasta el instrumento de medición.
- Ejecución de una perforación geofísica profunda de al menos 8 ¾" de diámetro hasta una profundidad que permita instalar un instrumento de medición geofísica unos 7 metros dentro del estrato de roca fresca.
- Instalación de tubo de PVC de 4" hasta la profundidad final de la perforación geofísica profunda y colocación de una lechada de cemento en el anular entre el terreno y el tubo para asegurar la transmisión de las ondas sísmicas hasta el instrumento de medición.
- Ejecución de una perforación geotécnica hasta la roca o una profundidad que permita la ejecución del ensayo de penetración estándar (SPT) y/o recuperación de muestras para la caracterización estática y dinámica del perfil de suelos, la cual fue estimada en unos 90 m de profundidad aproximadamente.
- Ejecución e interpretación de ensayos de laboratorio geotécnicos sobre muestras de suelo obtenidas en los sondeos geotécnicos y caracterización de las propiedades físicas y de resistencia de los suelos que conforman el perfil geotécnico en el área, cuyos resultados serán entregados en un documento complementario al presente informe una vez realizados los ensayos dinámicos de laboratorio correspondientes.

1.4 Objetivo del informe

El objetivo de este informe es presentar en forma resumida los resultados de las actividades de campo correspondiente a la ejecución de las perforaciones mencionadas en el alcance de las actividades, descritas en el apartado anterior.

Es importante resaltar que la información correspondiente a los resultados de laboratorio propuestos para las muestras recuperadas en la perforación geotécnica será entregada en el informe final de laboratorio correspondiente al proyecto.

La presentación y discusión de esta información incluye los siguientes aspectos:

- Descripción de la geología general del área.
- Descripción de los trabajos de campo y equipos utilizados.

- Descripción del perfil geotécnico idealizado e interpretado a partir de los ensayos de campo (*in situ*).
- Descripción del perfil litológico inferido de la perforación de los pozos para la colocación de los instrumentos geofísicos (*in situ*).
- Restitución del área afectada.

2 GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA EN ESTUDIO

Las perforaciones denominadas como P-1, P-2, P-3 y P-3A se ejecutaron en la zona occidental de la ciudad de Barquisimeto, en el sector Obelisco, específicamente en el Núcleo de la Universidad Centro-occidental “Lisandro Alvarado” (UCLA) Decanato de Ingeniería Civil (DIC).

Esta ciudad se encuentra asentada sobre un valle amplio limitado por el extremo nor-oriental de la Cordillera de los Andes Venezolanos y la Cordillera Caribe. Como se puede apreciar en la Figura 5, en la región afloran rocas de edades comprendidas entre el Cretácico Temprano hasta el Cuaternario. Estas unidades litoestratigráficas son descritas en la Tabla 1 en orden cronológico depositacional.

Según GARCIA *et al.* (1977), el Surco de Barquisimeto, tal como se le conoce a la región, presenta caracteres estratigráficos y estructurales particulares. En ella se tienen secuencias *flysch* Paleoceno-Eoceno inferior sobre unidades Cretácicas levemente metamorizadas que afloran tanto al sur de la Falla de Boconó (Serranía de Portuguesa) como al norte (área El Tocuyo-Carora- Barquisimeto). El contacto entre la secuencia tipo *flysch* y la secuencia Cretácica-Eocena es de naturaleza discordante, de tipo angular; generándose un *hiatus* o pérdida de información del registro geológico en el área. La cual, puede ser asociada a levantamientos y posterior exposición de las unidades de roca sedimentarias.

Desde el punto de vista tectónico, en las cercanías de la ciudad de Barquisimeto, cruza la Falla de Boconó (ver Figura 9), esta es una falla transcurrente de orientación noreste y posee movimiento rumbo deslizante dextral. Actualmente esta falla esta activa y es la principal generadora de la sismicidad en la zona. Sobre este tema comentan GIRALDO y AUDEMARD (1999) al sistema de fallas rumbo deslizantes-dextrales Boconó, San Sebastián, El Pilar y Oca-Ancón, que se encuentra a todo lo largo del norte de Venezuela, como un sistema que acomoda un desplazamiento de 150 Km. a lo largo del mismo, siendo la Falla del Bocono la que acumula tan solo entre 30 y 35 Km. de desplazamiento en la dirección del rumbo.

Este sistema evidencia una tectónica compresional que inicia hacia el Mioceno medio y es activo hasta el Reciente. El mismo, es responsable de una gran cantidad de eventos sismológicos de magnitud variable durante su historial sísmico.

En la Tabla 1 se describen en forma resumida la litoestratigrafía de las unidades que están presentes en el área de estudio y zonas adyacentes. Cabe destacar, que se describen inicialmente las unidades más jóvenes y se concluye con las unidades más antiguas. Esto con

el fin de darle al lector una idea del registro sedimentario y tener un control de la estratigrafía descrita en el área de estudio, siguiendo una secuencia *normal* de depositación durante el registro de sedimentación de la cuenca sedimentaria de Barquisimeto.

Tabla 1. Resumen de Unidades Litoestratigráficas

Formación		Edad	Espesor (m)	Descripción
Qs	Q ₀ -Q ₁ (*)	Pleistoceno superior-Reciente	10-40	Según GIRALDO y AUDEMARD (1997) los sedimentos mas recientes están constituidos por las arenas y conglomerados. Geomorfológicamente, corresponden a zonas de topografías bajas, a ambos lados de los cursos actuales de los ríos Turbio y Claro, ver Figuras 5, 6, 7 y 8.
	Q ₂ -Q ₃ (*)	Plioceno.	10-35	Igualmente descritas por GIRALDO y AUDEMARD (1997) hacia la base de esta secuencia, se han reconocido por primera vez, intervalos lacustres (varvas), que podrían corresponder al inicio de la apertura de la cuenca de tracción. En discordancia angular sobre los sedimentos pliocenos, descansan los conglomerados del pleistoceno inferior, sobre los cuales ha sido construida parcialmente la ciudad de Barquisimeto. Estos sedimentos, se encuentran bien expuestos a lo largo de la avenida La Ribereña, y de la carretera nueva de va desde Barquisimeto hacia Cabudare, correspondiendo a rampas detríticas o glacis, de pendientes muy suaves hacia el norte (<5°) ver Figuras 5, 6, 7 y 8.
El Pegón		Mioceno - Plioceno	100	Según el CIEN (1997) está formada por gravas, con cantos de hasta 25 cm, presenta cierta estratificación, y al meteorizar es de color amarillo a naranja, además están interestratificadas con capas gruesas y lentes de arenas arcillosas, friables, de color blanco a marrón claro y arcillas de color gris claro a gris azulado, con tintes marrón.
Moran		Paleoceno - Eoceno	500	CIEN (1997) describe a esta unidad como areniscas, lutitas y lentes menores de calizas. El Miembro Lutitas de El Tocuyo, en su base es una lutita de color gris que pasan a negras, marrón-verdoso y en el tope en color es rojo vino tinto, amarillo, negro y gris verdoso. El Miembro Areniscas de Botucal, consiste en ortocuarcita de color blanco a crema, que pasa a amarillo o marrón rojizo.
Matatere		Paleoceno - Eoceno	3000	Menciona el CIEN (1997) que esta unidad consiste en turbiditas, con varios horizontes de areniscas conglomeráticas y conglomerados líticos, estas rocas se componen de cuarzo, feldespato, micas y fragmentos líticos de composición variable, caliza, filita, esquisto, cuarcita, lutita y en menor proporción, rocas volcánicas y gneises.
Barquisimeto		Cenomaniense - Maastrichtiense	1700	CIEN (1997) menciona que esta unidad esta compuesta por en lutitas, limolitas, margas compactadas, ftanitas y calizas de color gris oscuro a negro en estado fresco y tonos muy claros de gris al meteorizar. Los porfidoblastos de pumpellita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo, ver Figura 8.
Bobare		Barremiense - Albiense	1700	Según CIEN (1997) esta unidad consiste esencialmente de areniscas cuarzosas de color gris oscuro, gris claro o crema en estado fresco y meteorizan a rojizo, de grano entre muy grueso y conglomerático y lutitas y limolitas de color gris oscuro en estado fresco y meteorizan a gris claro, amarillento, marrón verdoso y purpurino; son frecuentes las lentes delgadas y las concreciones de material ferruginoso.
Mamey		Cretácico Temprano	1400	CIEN (1997) describe a esta unidad que consiste esencialmente de esquisto cuarzo – sericítico con colores gris, naranja y marrón, en capas generalmente lenticulares, de espesores variables; metaconglomerado de colores crema a gris claro, intercalados con los primeros, con fragmentos que alcanzan dimensiones de guijarros, peñas y peñones de mármol, filita y arenisca; metaconglomerado calcáreo arcósico y mármol arenáceo conglomerático arcósico; metaarenisca generalmente calcárea y feldespática y filita negra grafitosa, localmente calcárea.

Nota (*): las unidades descritas por GIRALDO y AUDEMARD (1997) son unidades informales que describen la sedimentación del cuaternario en el área de Barquisimeto y sus alrededores y no se encuentran reconocidas aun en el Léxico Estratigráfico de Venezuela ni por el CIEN, Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura de PDVSA. Las mismas se pueden ver en distribución areal como las unidades Qs en la Figura 9, mapa geológico tomado de Hackley et al (2005)

REFERENCIAS

CIEN, 1997, **Código estratigráfico de Venezuela**, <http://www.pdv.com/lexico/>

García Jarpa, Raúl; Stephan, Jean Francois; Rondón, Fernando; Canelón, Gustavo; Fierro, Ignacio; Giegengack, Robert (1977). **Guía de la excursión No. 6: Cordillera de Los Andes y Surco de Barquisimeto**. Congreso Geológico Venezolano, Memorias, Tomo V, pp. 191-231. <http://www.pdvsa.com/lexico/excursio/exc-77f.htm>.

Hackley, P. C.; Urbani, F.; Karlsen, A. W.; Garrity, C. P. (2005) **Geologic shaded relief map of Venezuela**. USGS Series Open-File Report Report Number 2005-1038 Edition Version 1.0, online only in <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1038/>, Physical description: 2 sheets.

Renz, O., *et al.* (1955) **Submarine Sliding In Western Venezuela**. AAPG, Bull., vol. 39, N° 10, p. 2053-2067.

Giraldo, C. Y F. A. Audemard (1997) **“La cuenca de tracción de Cabudare, Venezuela Centro-Occidental”** Memorias del VII Congreso Geológico, SVG, Tomo I, pp. 351-357, Noviembre 1997

Giraldo, C. Y F. A. Audemard (1999) **“Right-lateral Slip along the Southern Boundary of the Caribbean Plate, Northern Venezuela.”** Editors: Mann P., Grindlay N. and J. Dolan and Sponsored by the Geological Society of America, Petroleum Research Fund, NSF and NASA. In: “Penrose Conference: Subduction to Strike-Slip Transitions on Plate Boundaries”, Jan. 18-24, 1999



Figura 5: Vista de las unidades Cuaternarias, Q₂-Q₃, en la avenida Nectario Maria (Rivereña), sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio



Figura 6: Vista panorámica de las unidades Cuaternarias, Q₂-Q₃, en la avenida Nectario Maria (Rivereña), sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio



Figura 7: Fotomosaico en detalle de las unidades Cuaternarias, Q₂-Q₃, donde se muestra el predominio de los conglomerados de esta secuencia, ubicado a lo largo de la avenida Nectario Maria (Rivereña), sector Aeropuerto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio



Figura 8: Fotomosaico en detalle de las unidades Cretácicas, formación Barquisimeto, donde se muestra el contacto discordante con las unidades cuaternarias, ubicado a lo largo de avenida Nectario Maria (Rivereña), sector Puente Macuto, al sur de la ciudad de Barquisimeto y el río Turbio

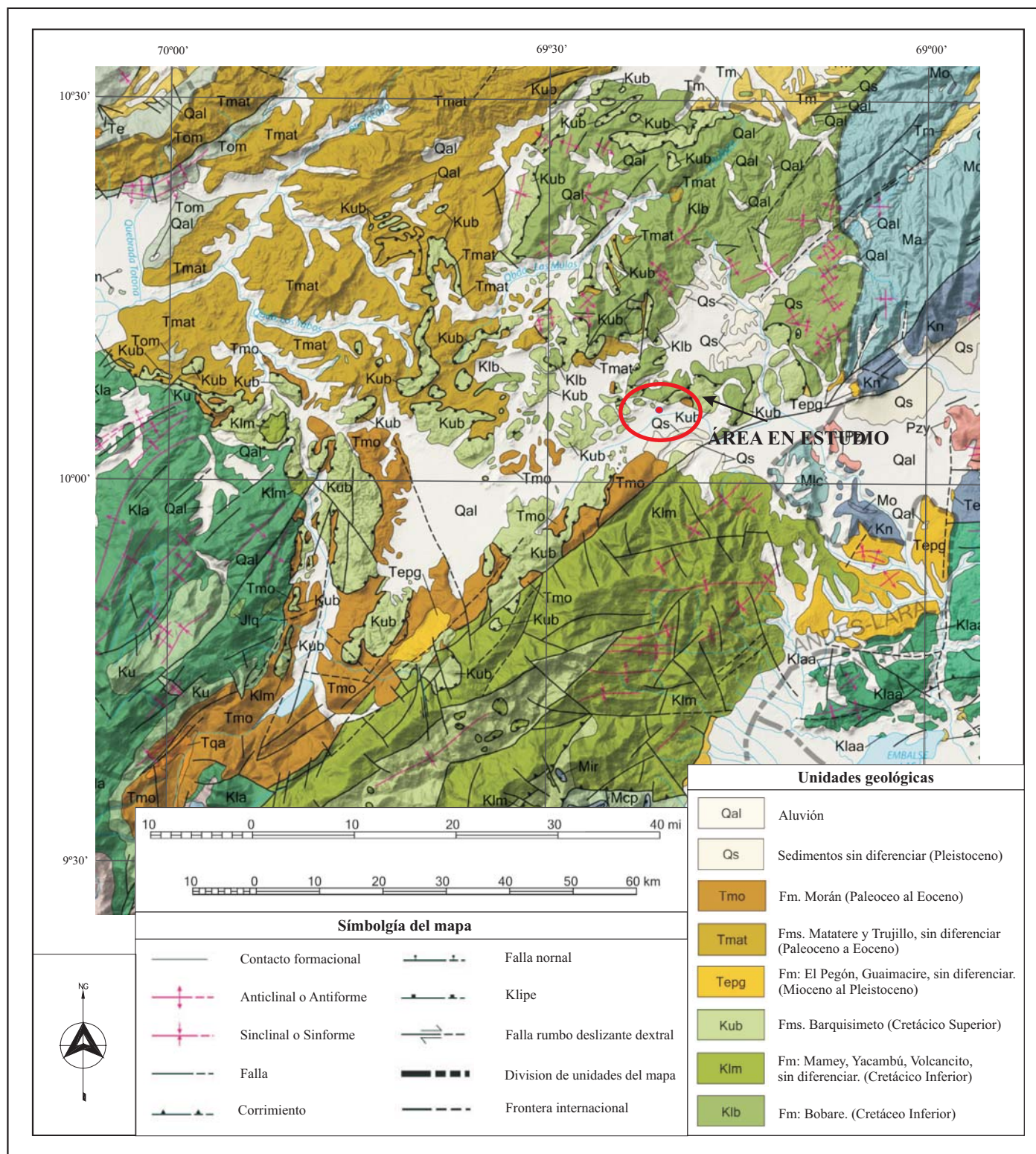


Figura 9. Mapa geológico estructural del área de estudio, tomado y modificado de Hackley, et al. (2005)

3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Pozos para geofísica

El programa de perforaciones para la instalación de equipos geofísicos consistió en la ejecución de dos (2) pozos, un primer pozo somero (denotado como P-2) con una profundidad de 37.10 m y 35.30 m de profundidad libre de medición; y un segundo pozo profundo (denotado como P-3), el cual alcanzó los 105.00 m de profundidad.

Durante la cementación de la perforación P-3, hubo infiltración de la lechada de cemento-bentonita dentro de la tubería PVC 4", lo cual trajo por consecuencia el relleno de la tubería en su parte interna, ocasionando en forma irreversible la pérdida del pozo P-3.

Debido a lo antes mencionado, se determinó en conjunto con FUNVISIS la localización de un nuevo pozo P-3A, (ver Figura 2), y se realizó una segunda perforación profunda, la cual tuvo como profundidad final 105.70 m y 104.50 m de profundidad libre de medición.

Las perforaciones P-2 y P-3A fueron entubadas desde superficie y hasta la profundidad final de perforación con una camisa cementada de PVC Schedule 80 de 4" de diámetro.

Los pozos geofísicos fueron ejecutados en el periodo comprendido entre el 12 de Marzo de 2006 y el 27 de Junio del mismo año.

El equipo de perforación utilizado para la realización de estos pozos fue una máquina de roto-percusión marca Ingersoll Rand, modelo TW3, cuyas características principales se muestran en la Figura 10.

Este equipo fue movilizado al sitio de los trabajos y luego de dar acondicionamiento al área y conectar el equipo de bombeo, realizar la fosa de mezclado y circulación del lodo bentonítico de perforación, conectar las mangueras, etc.; se dio inicio a las operaciones de perforación en el sitio.

**Características:**

- Cabezal de rotación hidráulico en el tope.
- Carrusel de tuberías con capacidad de alimentación automática de 6 barras.
- Sistema de mordazas hidráulicas para el soporte del ensamblaje de tuberías.
- Mástil estructural ajustable para la guía y verticalidad del ensamblaje de tuberías.
- Capacidad de empuje "Pulldown" de 30.000 lbs.
- Capacidad de levantamiento o izado "Pullback" de 26.000 lbs.
- Compresor de aire incorporado 900/350.

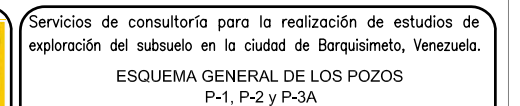
Figura 10: Equipo utilizado en la perforación de los pozos geofísicos

3.1.1 Ejecución de la perforación

Dada la profundidad requerida para las perforaciones, las características geológicas de la zona, en donde se considera la presencia de material aluvional hasta el contacto suelo-roca, se utilizó en forma combinada la perforación por roto-percusión, hasta donde la presencia de acuíferos o condiciones locales de suelo lo permitieron, y la perforación por rotación utilizando un circuito cerrado de lodo hasta la profundidad final de cada pozo.

El avance de la perforación se realizó mediante uso de una broca de 8 3/4", posteriormente se procedió a ensanchar el hueco a 9 7/8" de diámetro, hasta alcanzar la profundidad final. Este nuevo diámetro permite realizar el entubado apropiado del pozo con PVC 4" resultando un menor porcentaje de material de derrumbe durante la operación.

En la Figura 11 se muestra un esquema general de la perforación P-1 y los pozos P-2 de 37.10 m y el pozo P-3A, de 105.70 m de profundidad.




 Geotecnia e Ingeniería Sísmica
 GISCA

N°	REVISIÓN	FECHA:

La perforación de 37.10 m (P-2) se realizó utilizando un sistema de roto-percusión neumática (con aire comprimido) con una mecha de 8 ½" hasta alcanzar el nivel freático a los 18.00 m de profundidad. Luego, se cambia la metodología de avance, perforando con una mecha de 8 ¾" utilizando un sistema de bombeo de lodo, hasta alcanzar la profundidad final. El pozo fue ensanchado a 9 7/8" para facilitar el proceso de entubado.

La perforación de 105.70 m se realizó utilizando un sistema de roto-percusión neumática con una mecha de 8 ½" de diámetro hasta una profundidad de 14.00 m, por lo descrito anteriormente en la ejecución del pozo P-2, se procedió a cambiar la metodología de avance, perforando con una mecha de 8 ¾" utilizando un sistema de circuito cerrado de lodo, ajustando el peso de la columna hidráulica a las condiciones locales de resistencia de la formación para garantizar la estabilidad y limpieza apropiada del hoyo de perforación.

Al alcanzar la profundidad final de la perforación, se procedió a ampliar el diámetro del hoyo 9 7/8" de diámetro, repasando la longitud total de la perforación.

Para minimizar el efecto de espiral que puede desviar la ruta proyectada para el pozo durante su ejecución y que se genera en la perforación por rotación pura y optimizar la verticalidad del pozo profundo, se utilizó un sistema de sobrepeso en la mecha de hasta unos 2000 kg aproximadamente, ver figura 12



Figura 12: Vista del sistema de sobrepeso en la mecha

El circuito cerrado de lodo de perforación estuvo conformado por un depósito para la circulación del fluido durante la perforación y un depósito para la sedimentación de los sólidos (véase Figura 13 y Figura 14).

Durante el proceso de perforación y de acuerdo con las necesidades de almacenamiento en sitio, los sólidos de perforación fueron transportados a un área determinada para este fin de

manera provisional y posteriormente a un botadero para la disposición apropiada de estos materiales. Esto permitió mantener el área de operaciones con el mínimo impacto ambiental.

Una vez concluido el repaso de la perforación con la broca de diámetro 9 7/8", se procedió a entubar con PVC de 4" la totalidad del pozo, y cementar el espacio anular entre las paredes de la perforación y la parte externa de la tubería PVC de 4", tal como se describe en el aparte 3.1.4.



Figura 13: Depósito para la circulación del fluido durante la perforación



Figura 14: Vista de la fosa de lodo, canal de circulación y ubicación de equipos.

3.1.2 Litología inferida de las perforaciones de pozos geofísicos

3.1.2.1 Perforación P-2

Profundidad de perforación: 37.10 m

Profundidad libre de la tubería de PVC, para las mediciones: 35.30 m

La litología observada durante la perforación del pozo P-2 (véase Anexo A) indica sedimentos heterogéneos en donde hay intervalos principalmente arenosos y limosos. Existe grava fina entre aproximadamente los 16.00 m y los 18.00 m de profundidad. Luego de los 18.00 m y hasta la profundidad final, no se realizó muestreo, sin embargo, se observó en los ripios de perforación generados durante el avance de la perforación del pozo, arcillas arenosas y/o limosas. Los colores varían; observándose el predominio del color marrón y a medida que se profundiza degrada a marrón amarillento.

Los primeros 18.00 m de perforación fueron ejecutados por roto-percusión neumática, posteriormente debido a las limitantes que presenta esta metodología en presencia de agua subterránea, la cual se encontró a los 18.00 m, se cambió a perforación por rotación y circulación de lodo.

La Figura 11 muestra un esquema del diseño del pozo correspondiente a la perforación P-2. Se puede observar que la tubería instalada es de PVC Schedule 80 con un diámetro interno de 4" presenta un tapón de concreto en la punta de 1,00 m de longitud, que ha sido reforzado con cabillas de acero que miden $\frac{3}{4}$ ", y están orientadas en direcciones ortogonales con una separación de 20 cm. entre sí.

La tubería de PVC está recubierta en el espacio anular entre el tubo PVC y el sedimento, con una lechada de cemento y bentonita hasta una profundidad de aproximadamente 37.10 m.

3.1.2.2 Perforación P-3

Profundidad de perforación: 105.00 m

Perforación perdida, debido a infiltración de cemento-bentonita dentro del pozo al momento del cementado.

La litología observada durante la perforación del pozo P-3 (véase Anexo A) indica sedimentos heterogéneos en donde hay intervalos principalmente arenosos y limosos; a medida que se profundiza, estos sedimentos cambian a materiales principalmente cohesivos combinados con material granular.

Los primeros 10.00 m de perforación no se muestrearon por sugerencia del personal de FUNVISIS, luego de esta profundidad comenzó el muestreo y se evidenció la presencia de conglomerados y/o grava fina entre los 10.00 m y los 20.00 m de profundidad.

Luego de los 20.00 m y hasta los 28.00 m aproximadamente, se encontraron sedimentos principalmente areno-limosos, después de los 28.00 m y hasta los 90.00 m el material cambia a arcilla con limos y arenas. De los 90.00 m hasta los 105.00 m se avanzó en la roca existente, compuesta por areniscas y lutitas. Los colores varían; observándose el predominio del color marrón y a medida que se profundiza degrada a marrón amarillento.

3.1.2.3 Perforación P-3A

Profundidad de perforación: 105.70 m

Profundidad libre de la tubería de PVC, para las mediciones: 104.50 m

La litología observada durante la perforación del pozo P-3A fue similar a la del pozo P-3, el cual se perforó a 1.50 m de distancia uno del otro. El proceso de perforación del Pozo P-3A, se realizó sin recuperación de muestras, sin embargo, se observaron los ripios de perforación generados durante el avance de la perforación del pozo las características de los sedimentos presentes y su similitud con los conseguidos en el Pozo P-3.

Toda la perforación fue desarrollada mediante rotación con circulación de lodo, con diámetro 8 ½" en el avance y luego repasada con una broca de 9 7/8" hasta la profundidad final (105.70 m). La Figura 11, muestra un esquema del diseño del pozo correspondiente a la perforación P-3A.

Se puede observar que la tubería instalada es de PVC Schedule 80 con un diámetro interno de 4". Presenta un tapón de concreto en la punta de 1.00 m de longitud, que ha sido reforzado con cabillas de acero que miden ¾", y están orientadas en direcciones ortogonales con una separación de 20 cm entre sí.

La tubería de PVC está recubierta en el espacio anular entre el tubo PVC y el sedimento, con una lechada de cemento y bentonita hasta una profundidad de aproximadamente 105 m.

3.1.3 Identificación de la roca fresca

Existen diversos materiales litológicos los cuales se clasifican en:

- Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias están compuestas por una gran variedad de minerales. Estas se diferencian según su origen. Las ígneas por cristalización de un magma fundido, las metamórficas por cambios de presión y temperatura en cualquiera de los 3 tipos y las sedimentarias, por la litificación de un conjunto de sedimentos depositados en una cuenca gracias a los procesos sedimentarios.
- Roca meteorizada (ígneas, metamórficas y sedimentarias). Estas preservan algunos rasgos de la roca origen, pero se encuentran descompuestas en las zonas expuestas a la intemperie.

- El suelo residual (residual, aluvial, paleosuelo, coluvial, glacial y loess). Es formado como consecuencia de la descomposición de una roca (ígneas, metamórficas o sedimentarias) y este no ha sido transportado, o sea, permanece *in situ*.

Las rocas metamórficas son el resultado del metamorfismo (cambios de presión y temperatura) o recristalización de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas metamórficas más comunes son la cuarcita, el gneis, el esquisto, la serpentinita, la pizarra, la filita y el mármol. Estas rocas presentan diferentes texturas y características.

El chert es un mineral, la cuarcita y el mármol exhiben textura granoblástica y la primera se caracteriza por ser de grano fino producto del metamorfismo de una roca rica en cuarzo, y la última por ser de grano fino a gruesos, producto del metamorfismo de una roca rica en carbonato de calcio (calcita o dolomita). El gneis exhibe una textura bandeada determinada por granos minerales laminares alargados. El esquisto, la pizarra y la filita muestran una textura foliada con características finas debido a la orientación de minerales.

El gneis es una roca con textura bandeada cuyos componentes esenciales son el cuarzo y el feldespato presentando bandas de otros minerales accesorios como la biotita, la muscovita y los anfíboles.

El esquisto es una roca que se compone de cristales laminares de micáceo, la clorita, la biotita y la muscovita, y el cuarzo (como componente esencial).

El proceso de identificación del estrato de roca fresca estuvo soportado tanto por el cambio de las características de la mecánica de perforación, como por las características geológicas de los cortes de perforación, y la información obtenida de la perforación geotécnica P-1.

En una primera aproximación se utilizó la mecánica de la perforación como el primer marcador de la presencia de un estrato duro de consistencia similar a un estrato de roca. Si las características mecánicas se lograban mantener más allá de unos 6 a 8 m de profundidad para evitar que se estuviese perforando en un bloque de roca aislado en el aluvión, entonces se procedió a verificar las características mineralógicas del material para asegurar que fueran propias de una roca fresca. Este procedimiento permitió identificar el estrato de roca fresca a unos 90 m de profundidad aproximada.

3.1.4 Cementación del tubo de PVC de 4" para la instalación del equipo de medición

Una vez alcanzada la profundidad final de perforación, se procedió a circular el pozo para limpiarlo de los sólidos de la perforación que pudieran sedimentarse en el proceso. Adicionalmente, y como se mencionó anteriormente, se continuó unos 7 m por debajo de la cota programada de asiento de la perforación de 30 m y unos 14 m por debajo de la cota programada para la perforación de 90 m, con la finalidad de compensar la longitud del tapón del tubo de 4", la sedimentación de los ripios que no puedan ser eliminados durante la

circulación del pozo y las condiciones de borde exigidas por el proceso de medición geofísica en roca.

Para el entubado de los pozos se utilizó un tubo de PVC de 4" Schedule 80 con centralizadores colocados a cada 6 m para los pozos P-2 y P-3A. (véase Figura 14).

Esta tubería fue colocada utilizando el equipo de perforación como guía y para el pozo profundo se utilizó agua dentro de la tubería para disminuir los esfuerzos en la misma. El agua dentro de la tubería de 105 m fue removida una vez concluido el proceso de cementación para maximizar una condición estanca dentro de la tubería. Sin embargo, los pozos pueden presentarse agua por condensación.

Se construyó primero una sección guía de concreto que consiste en la colocación de mallas de acero fabricadas con cabillas de 3/8" en forma de roseta y que atraviesa la sección del tubo PVC de 4" a cada 20 cm. a lo largo de aproximadamente 1 metro desde la punta del tubo, las cuales son cementadas con una mezcla de concreto con una resistencia a la compresión mínima de 250 kg/cm² (véase la Figura 15).

Esta sección cumple dos funciones, la primera como tapón de la tubería para garantizar estanquidad y la segunda como punta del tubo para resistir la presión generada por el proceso de instalación, ya que al colocar agua dentro de la tubería disminuyen los esfuerzos.

Después de construir la sección guía se procede a bajar la tubería conectando tramos consecutivos de tubos de PVC de 4" de diámetro nominal con juntas tipo campana enroscadas. Adicionalmente, se utilizó grasa de vacío para los pozos P-2 y P-3A, esto con el fin de garantizar la estanquidad durante el proceso de fraguado del cemento del anular.

Esta tubería es colocada utilizando el equipo de perforación como guía sujetando el tubo PVC en superficie para garantizar la seguridad de la operación durante el proceso de ensamblaje de los tramos consecutivos y posterior cementación del anular entre el tubo de PVC y el hoyo de perforación.

El proceso de cementación se realizó con una lechada agua-cemento-bentonita, compuesta por una mezcla base aproximada de 18 sacos de cemento tipo A o B y 35 kg de bentonita por metro cúbico de mezcla.

Esta mezcla se bombeó desde superficie a través de una tubería de acero 1 1/4" de diámetro, la cual fue extrayéndose por tramos proporcionalmente al volumen de lechada inyectada, hasta alcanzar la superficie del terreno.

Una vez culminado el proceso de cementación, el tubo de PVC es protegido en superficie para evitar cualquier movimiento no deseado durante el fraguado del cemento y el equipo de perforación fue retirado del sitio. El exceso de agua en la tubería fue removido en su totalidad utilizando un sistema de bombeo neumático diseñado para tal fin.



Figura 14: Vista general del proceso de entubado.



Figura 15: Detalle de colocación del centralizador.

3.2 Perforación geotécnica

El sondeo geotécnico fue la primera perforación en realizarse en sitio, de manera de poder alcanzar el basamento rocoso, con recuperación de muestra adecuada, que nos permita identificar el tipo de roca, características y espesor del sedimento en sitio.

La perforación geotécnica se realizó con un equipo de perforación de pozos geotécnicos, marca Sprague Henwood C40 y cuyas características principales son:

- Sistema de perforación hidráulico montado sobre Skid
- Sistema de ensamblaje de mástil para SPT.
- Sistema de bombeo
- Motor reductor para el control de rotación.

3.1.1 Ejecución de la perforación y muestreo

Se realizó una perforación geotécnica convencional utilizando percusión y lavado en las zonas donde el número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_{SPT}) fuese menor a 80, y rotación o perforación combinada para aquellas zonas duras o densas con avances controlados a cada 0,50 m para verificar el tipo de material que se estaba perforando, material que en la mayoría de los casos correspondía a parte de esquistos transportados como material coluvial y/o aluvial meteorizado, tal y como se evidencia en el registro del sondeo geotécnico presentado en el Anexo B.

La técnica de percusión y lavado permitió la toma de muestras perturbadas utilizando un muestreador de tipo cuchara partida a intervalos de un metro de profundidad. A medida que se profundizaba se colocó una camisa protectora o forro Bx (76 mm aprox).

Durante el desarrollo de la perforación fue necesario en algunos intervalos de la misma, realizar el avance mediante rotación debido a la presencia de peñones, luego a partir de los 87 m se perforó mediante rotación únicamente hasta los 91.50 m. Dado que el material avanzado presentó características y dureza constante, se consideró que nos encontrábamos en el basamento rocoso de la formación.

Las muestras perturbadas se colocaron en frascos plásticos con tapas selladas herméticamente y fueron identificadas señalando el nombre del proyecto, número de perforación, fecha, número de muestra y profundidad, longitud de recuperación y resistencia a la penetración normal (N_{SPT}), en el caso de haberse hecho este ensayo. Estas muestras fueron almacenadas cuidadosamente y transportadas al laboratorio para sus respectivos análisis.

Simultáneamente a la toma de muestras perturbadas, se realizó el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) que consiste en hincar en el subsuelo un tubo muestreador de pared gruesa ó cuchara partida de 2" de diámetro exterior (5,08 cm) y de una longitud mínima de 2 pies (60 cm) utilizando la energía que provee los golpes de un martillo de 63,5 kg (140 lb) con una

caída libre de 76 cm. El número de golpes necesarios para hincar el tubo muestreador los últimos 30 cm en el terreno de un total de 45 cm de penetración, es lo que se conoce como resistencia del suelo a la penetración (N_{SPT}), estableciéndose la densidad relativa en los suelos granulares y la consistencia en los suelos cohesivos (ASTM D-1586). Estos valores son reportados en el registro del sondeo geotécnico presentado en el Anexo B.

La obtención de muestras imperturbadas utilizando un tubo muestreador de pared delgada tipo Shelby de 2 ½" (50 mm) de diámetro e hincado a presión en el suelo estuvo limitada por la consistencia o densidad de los materiales presentes en el subsuelo. Es importante mencionar que esta técnica de muestreo está limitada para suelos cuya resistencia a la penetración (N_{SPT}) es mayor 30. Sin embargo, se logró obtener una muestra de este tipo a 9.00 m de profundidad.

Las muestras se sellaron herméticamente en sitio e identificadas señalando el nombre del proyecto, número de perforación, fecha, número de muestra y profundidad a la cual fue tomada. Estas muestras fueron transportadas a la sede de GISCA para luego ser enviadas al laboratorio de caracterización dinámica en Canadá.

Los resultados obtenidos de las pruebas *in situ* (SPT) se presentan en el registro del sondeo geotécnico del Anexo B.

Es importante resaltar que la información correspondiente a los resultados de laboratorio propuestos para las muestras recuperadas en la perforación geotécnica serán entregados en el informe final del proyecto.

3.1.2 Evaluación del nivel freático

Para la época del año en la cual se realizaron los sondeos exploratorios (Marzo, Abril, Mayo y Junio de 2006), el nivel freático se detectó en las profundidades que se muestran en la Tabla 2 siguiente:

Perforación o pozo	Nivel freático (m)
P-1	14.00 m
P-2	16.00 m
P-3	15.00 m
P-3A	14.00 m

Tabla 2: Profundidad del nivel freático

3.1.3 Descripción del perfil geotécnico idealizado e interpretado a partir de los ensayos de campo

El perfil geotécnico del área estudiada hasta los 105 m de profundidad, se puede inferir en forma preliminar utilizando la descripción visual de las muestras de suelo recuperadas en campo y los resultados de las pruebas *in situ*. Estas propiedades serán ajustadas con base en los resultados de los ensayos de laboratorio. Sin embargo, en el registro del sondeo geotécnico del Anexo B se incluye una información preliminar referente a:

- Tipo principal de suelo
- Componentes secundarios del suelo
- Estructura, textura y otras descripciones pertinentes
- Color

A partir de esta información, se puede interpretar preliminarmente que el perfil geotécnico hasta 105 m de profundidad para el área estudiada está constituido por sedimentos aluvionales con una configuración estratigráfica heterogénea, observándose un estrato superficial de material granular con alto contenido de limo y arcilla.

Perforación P-1

Profundidad de perforación SPT: 91.50 m

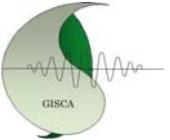
Las pruebas de Ensayo de Penetración Estándar (*SPT*) comprueban el grado de heterogeneidad de los depósitos aluviales ya que los sedimentos mostraban un muy bajo grado de diagénesis y una gran variedad de tamaño de grano. Comúnmente se encontraron clastos de una mineralogía cuarzo muscovítica, moteado blanco, amarillo y marrón. Estos clastos se meteorizaban a arcilla micácea, o a arena fina limosa micácea en el caso de los clastos con textura gnéisica. La abundancia de estos clastos, así como la presencia de fragmentos de cuarzo dificultaban el avance de la cuchara y la recuperación de muestras de suelo en la prueba *SPT*. Era indispensable rotar con lavado para avanzar en profundidad, para luego realizar el *SPT*.

En general, las facies presentes corresponden a capas conglomeráticas con una matriz principalmente arcillosa. El grado de escogimiento es pobre y los clastos varían en tamaño y forma. Presentan un bajo grado de diagénesis, ya que el sedimento está poco consolidado. Sin embargo, hay una interpretación no adecuada arrojada por los números de golpes registrados en el ensayo *SPT*, porque existe una abundancia de fragmentos de cuarzo y de peñas y peñones de esquistos poco meteorizados a meteorizados que generó resistencia a la penetración de la cuchara.

En el registro del sondeo geotécnico del Anexo B se encuentra incluido el perfil litológico preliminar de la perforación, así como un resumen de los valores resultantes de los ensayos de *SPT* realizados en campo. A continuación se presentan algunas de las muestras obtenidas en la perforación:

ANEXO A

Registros de sondeos para los pozos geofísicos



Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare

Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil

Proyecto No.: P-100566

Coordenadas: N E

Cota: m

Longitud: 37.10 m

Nivel Freático: 16.00 m

Caída del Martillo: cm

Peso del Martillo: lb

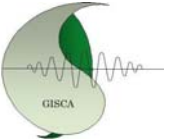
Fecha: 12-05-06

Perforación No.: P-2

Página: 1 de 2



PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN							
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20406080	ω (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP 12243648	GRAVA ARENA FINOS 20406080	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)		
1					ARENA fina a media, limosa, marrón											
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16										16.00	GRAVA de matriiz arenosa, marrón					
17																
18																
19																
					20.00											
ABREVIATURAS																
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx		Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total	
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna			



Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare

Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil

Proyecto No.: P-100566

Coordenadas: N E

Cota: m

Longitud: 37.10 m

Nivel Freático: 16.00 m

Caída del Martillo: cm

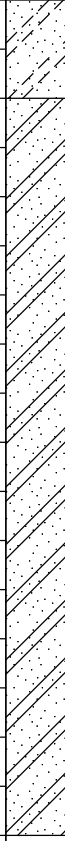
Peso del Martillo: lb

Fecha: 12-05-06

Perforación No.: P-2

Página: 2 de 2



PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN							
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20406080	ω (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP 12243648	 GRAVA  ARENA  FINOS 20406080	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)		
21					ARENA fina a media, arcillosa, marrón			● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20406080	ω (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP 12243648	 GRAVA  ARENA  FINOS 20406080	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)		
22					22.00											
23					ARCILLA de baja plasticidad, arenosa, marrón claro											
24																
25																
26					Presencia de grava a 25,00 m											
27																
28																
29					Presencia de grava a 28,00 m											
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																
37					37.00											
38																
39																

ABREVIATURAS

SHShelby

DDenison

M

NRNo Recuperó

RBRotación de D = Bx

RNRotación de D = Nx

▼

Nivel Freático

ω

Contenido de Humedad

LLLímite Líquido

LP

GsGravedad Específica

IPÍndice Plástico

SuResistencia al Corte no drenado

φÁngulo de Fricción Interna

γ

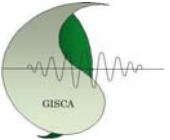
Peso Unitario Total

Realizado: Verificado:

Fecha: Fecha:

Aprobado:

Fecha:



Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare

Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil

Proyecto No.: P-100566

Coordenadas: N E

Cota: m

Longitud: 105.00 m

Nivel Freático: 14.00 m

Caída del Martillo: cm

Peso del Martillo: lb

Fecha: 30-03-06

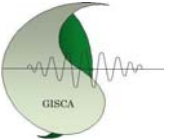
Perforación No.: P-3/P-3A

Página: 1 de 6

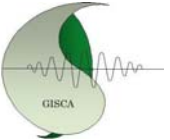


PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN												
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20406080	ω (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP 12243648	GRANULOMETRIA (%)  GRAVA  ARENA  FINOS 20406080 Gs γ (t/m³) Su (kg/cm²) φ (°)											
1					ARENA fina a media, limosa, marrón																
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11					GRAVA de matriz arenosa, marrón																
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20					Marrón claro a 15,00 m																
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30					Marrón claro a 20,00 m																
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					
41																					
42																					
43																					
44																					
45																					
46																					
47																					
48																					
49																					
50																					
51																					
52																					
53																					
54																					
55																					
56																					
57																					
58																					
59																					
60																					
61																					
62																					
63																					
64																					
65																					
66																					
67																					
68																					
69																					
70																					
71																					
72																					
73																					
74																					
75																					
76																					
77																					
78																					
79																					
80																					
81																					
82																					
83																					
84																					
85																					
86																					
87																					
88																					
89																					
90																					
91																					
92																					
93																					
94																					
95																					
96																					
97																					
98																					
99																					
100																					

ABREVIATURAS																
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx		Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total	
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna			

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 105.00 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: cm Peso del Martillo: lb	Perforación No.: P-3/P-3A	
			Fecha: 30-03-06	Página: 2 de 6	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN												
								NÚMERO DE GOLPES/PIE	ω (%)	PROPIEDADES INDICE (%)				GRANULOMETRIA (%)				Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)
								% RQD		LP	ω	LL	IP	GRAVA	ARENA	FINOS					
								20 40 60 80		12 24 36 48	20 40 60 80										
21					ARENA fina a media arcillosa, marrón																
22					Presencia de grava a 22,00 m																
23																					
24																					
25					Presencia de grava a 25,00 m																
26																					
27																					
28					28.00																
29					ARCILLA de matriz arenosa, amarillo marrón																
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
ABREVIATURAS																					
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total						
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna								

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 105.00 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: cm	Perforación No.: P-3/P-3A	
			Peso del Martillo: lb	Página: 3 de 6	
			Fecha: 30-03-06		

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRAFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREATICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN						
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE <							

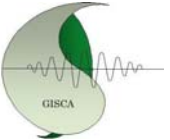
ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

Realizado:
Verificado:

Fecha:
Fecha:

Aprobado:

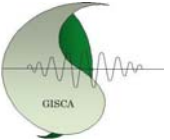
Fecha:

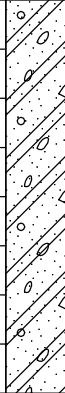
	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 105.00 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: cm Peso del Martillo: lb	Perforación No.: P-3/P-3A	
			Fecha: 30-03-06	Página: 4 de 6	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20 40 60 80	ω (%) ○ LP — (I) ● LL ○● IP 12 24 36 48	GRANULOMETRIA (%)				Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
										GRAVA ARENA FINOS	20 40 60 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
61					ARENA media a gruesa, arcillosa con grava																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

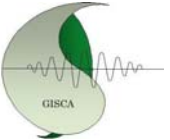
ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

Realizado:	Fecha:	Aprobado:	Fecha:
Verificado:	Fecha:		

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 105.00 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: cm	Perforación No.: P-3/P-3A	
			Peso del Martillo: lb	Página: 5 de 6	
			Fecha: 30-03-06		

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN																		
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20 40 60 80	ω (%) 12 24 36 48	PROPIEDADES INDICE (%)	GRANULOMETRIA (%)	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)												
								○ LP — ω ● LL ○● IP	 GRAVA  ARENA  FINOS																		
81					ARCILLA de baja plasticidad, arenosa con fragmentos de lutita, marrón claro																						
82					Fragmentos de arenisca a 85,00 m																						
83																											
84																											
85																											
86																											
87																											
88																											
89					PEÑONES de arenisca																						
90																											
91					ARENISCA																						
92																											
93																											
94																											
95																											
96																											
97																											
98																											
99																											

ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		



Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare

Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil

Proyecto No.: P-100566

Coordenadas: N E

Cota: m

Longitud: 105.00 m

Nivel Freático: 14.00 m

Caída del Martillo: cm

Peso del Martillo: lb

Fecha: 30-03-06

Perforación No.: P-3/P-3A

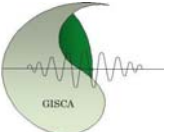
Página: 6 de 6



PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN								
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD 20406080	ω (%)	PROPIEDADES ÍNDICE (%)	GRANULOMETRIA (%)	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)		
								○ LP ● LL	— ω ○● IP	GRAVA ARENA FINOS 20406080							
-101					ARENISCA					12243648	20406080						
-102																	
-103																	
-104																	
-105																	
-106					105.00												
-107																	
-108																	
-109																	
-110																	
-111																	
-112																	
-113																	
-114																	
-115																	
-116																	
-117																	
-118																	
-119																	
ABREVIATURAS																	
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total		
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna				

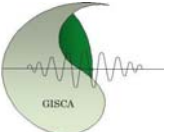
ANEXO B

Registro del sondeo geotécnico

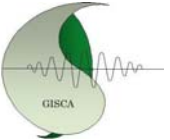
	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 91.50 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: 76 cm Peso del Martillo: 140 lb	Perforación No.: P-1	
			Fecha: 05-03-06	Página: 1 de 5	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRAFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREATICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD		RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN								
								NÚMERO DE GOLPES/PIE	% RQD	ω (%)	PROPIEDADES INDICE (%)		GRANULOMETRIA (%)		Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)
											○ LP — ω	● LL ○● IP	GRAVA	ARENA				
								20 40 60 80		12 24 36 48	20 40 60 80							
1			Rbx-1		GRAVA (esquisto y cuarzo)													
2			M-2			2	73											
3			M-3		ARENA media a fina arcillosa con grava (cuarzo), marrón y gris (SC)	MUY DENSA	54		5									
4			M-4			4	52											
5			M-5		ARCILLA de baja plasticidad, arenosa con grava, marrón (CL)	DURA	53		15	17	36							
6			M-6		ARENA media a fina, arcillosa con grava fina (cuarzo), marrón (SC)		80		7									
7			M-7			MUY DENSA	80		6									
8			M-8				29											
9			SH-9			9												
10			M-10		ARCILLA de baja plasticidad, arenosa, marrón amarillento y gris (CL)	DURA	50		18	19	36							
11			M-11		ARENA arcillosa con grava fina (fragmentos de esquisto), marrón (SC)		81		11									
12			M-12			MUY DENSA	80		7									
13			M-13			13	80		6									
14			M-14		ARCILLA limosa con grava (fragmentos de esquisto y cuarzo), marrón (CL)	DURA	80		14									
15			M-15		ARCILLA de baja plasticidad muy arenosa, presencia de grava (esquisto), marrón amarillento y marrón (CL)		65		10									
16			M-16		Trozo de esquisto duro a 14.50 m	DURA	48		10	16	26							
17			M-17				58		11									
18			Rbx-19		Pequeños peñones de arenisca y esquisto, gris													
19			Rbx-20															
20																		

ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx		Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Especifica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 91.50 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: 76 cm Peso del Martillo: 140 lb	Perforación No.: P-1	
			Fecha: 05-03-06	Página: 2 de 5	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD		RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN								
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE % RQD	ω (%)	PROPIEDADES INDICE (%)		GRANULOMETRIA (%)		Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)	
								20406080		12243648	20406080							
21			M-21		ARCILLA de baja plasticidad limosa, marrón y gris (CL)	DURA	67		9	1631								
22			M-22		Trozo de esquisto duro a 21.50 m		48		15	1836								
23			M-23		ARENA arcillosa con grava fina (fragmentos de esquisto), marrón y gris (SC)	MUY DENSA	80		18									
24			M-24		Marrón amarillento y grava (esquisto y cuarzo) a 23,00 m		80		15									
25			M-25		ARCILLA de baja plasticidad, marrón amarillento, rojizo y gris claro (CL)	DURA	80		9									
26			M-26				80		12	1631								
26			Rbx-27				80		18	2453								
27			M-28				80		21									
28			M-29				80		23									
29			M-30				80		15									
30			M-31				80		15									
31					ARCILLA limosa con grava (cuarzo y fragmentos de lutita), rojizo, marrón amarillento y gris (CL)		DURA											
32																		
33			M-32		ARCILLA de baja plasticidad limosa, marrón y gris, presencia de oxidación gris oscuro (CL)			80		11	1944							
34																		
35																		
36			M-33					80		19								
37																		
38																		
39			M-34					80		16								
ABREVIATURAS																		
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx		Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total			
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna					

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 91.50 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: 76 cm Peso del Martillo: 140 lb	Perforación No.: P-1	
			Fecha: 05-03-06	Página: 3 de 5	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRAFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREATICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN							
								NÚMERO DE GOLPES/PIE % RQD	ω (%)	PROPIEDADES INDICE (%)		GRANULOMETRIA (%)	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)
										LP LL	ω IP					
41					ARCILLA de baja plasticidad limosa, marrón y gris, presencia de oxidación gris oscuro (CL)		41	41 60	18	20 37	GRAVA					
42		M-35														
43																
44					Zona de arcilla arenosa a 44.50 m		80	80 80	12	12 12						
45		M-36														
46																
47																
48		M-37					77	77 77	19	19 19						
49																
50																
51		M-38			Presencia de fragmentos blandos de lutita, marrón ARCILLA de baja plasticidad arenosa, marrón (CL)	DURA	80	80 80	12	16 32						
52																
53																
54		M-39					80	80 80	19	19 19						
55																
56																
57		M-40			Lentes de arena media arcillosa a 56.50 m		80	80 80	12	12 12	ARENA FINOS					
58																
59					Presencia de oxidación gris oscuro a 59.50 m											
		M-41					78	78 78	12	18 34						

ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

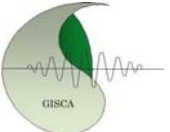
ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	RBx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

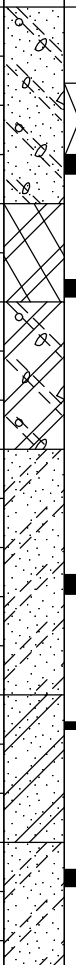
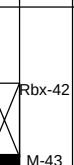
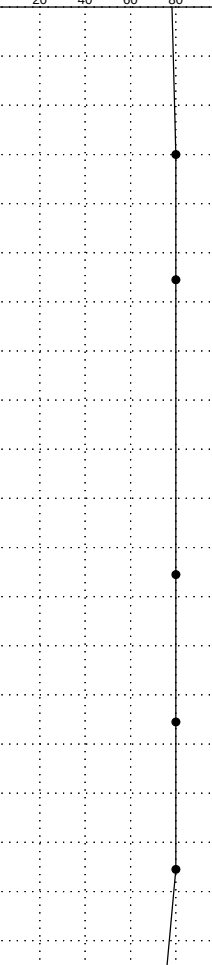
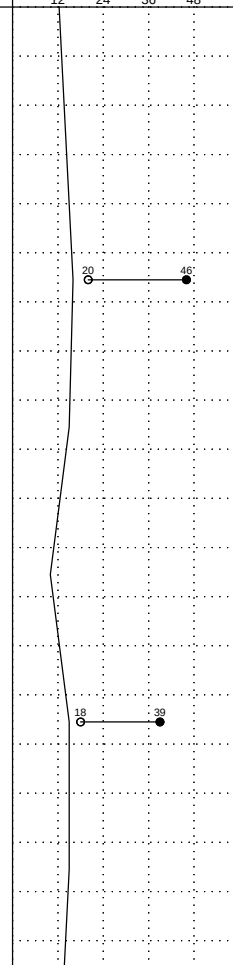
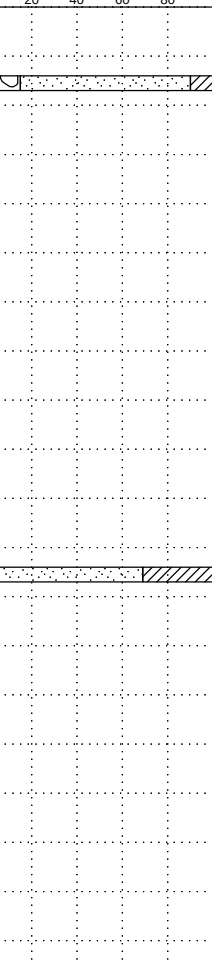
Realizado:
Verificado:

Fecha:
Fecha:

Aprobado:

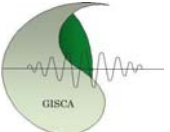
Fecha:

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 91.50 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: 76 cm Peso del Martillo: 140 lb	Perforación No.: P-1	
			Fecha: 05-03-06	Página: 4 de 5	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN						
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD	○ LP — ○ ● LL ○● IP ω (%)	PROPIEDADES ÍNDICE (%) ○ LP — ○ ● LL ○● IP	GRANULOMETRÍA (%) GRAVA ARENA FINOS	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)
61			Rbx-42		ARENA gruesa a media con limo y grava fina (cuarzo), marrón (SM)	MUY DENSA	80		16						
62			M-43												
63															
64					ARCILLA de baja plasticidad limosa, marrón y gris (CL)	DURA	80								
65															
66			M-44		ARCILLA de baja plasticidad limosa con presencia de grava (fragmentos de lutita dura), marrón (CL)										
67															
68															
69			Rbx-45		ARENA media a fina arcillosa, marrón y gris (SC)	MUY DENSA	80								
70															
71															
72			M-46												
73															
74					ARCILLA de baja plasticidad, arenosa marrón (CL)	DURA	80								
75			M-47												
76															
77															
78			M-48		ARENA media a fina arcillosa, marrón y gris (SC)	MUY DENSA	80								
79															

ABREVIATURAS															
SH	Shelby	M	Muestra SPT	Rbx	Rotación de D = Bx	▼	Nivel Freático	LL	Límite Líquido	Gs	Gravedad Específica	Su	Resistencia al Corte no drenado	γ	Peso Unitario Total
D	Denison	NR	No Recuperó	RNx	Rotación de D = Nx	ω	Contenido de Humedad	LP	Límite Plástico	IP	Índice Plástico	φ	Ángulo de Fricción Interna		

Realizado: _____ Fecha: _____
 Verificado: _____ Fecha: _____
 Aprobado: _____ Fecha: _____

	Proyecto: Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudades de Barquisimeto y Cabudare Localización: UCLA-Decanato de Ingeniería Civil Proyecto No.: P-100566	Coordenadas: N E Cota: m Longitud: 91.50 m Nivel Freático: 14.00 m	Caída del Martillo: 76 cm Peso del Martillo: 140 lb	Perforación No.: P-1	
			Fecha: 05-03-06	Página: 5 de 5	

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL ESTRATIGRÁFICO	% RECUPERADO	MUESTRA NO.	NIVEL FREÁTICO	DESCRIPCIÓN VISUAL	CONSISTENCIA O DENSIDAD DEL SUELO/ESTADO FÍSICO DE ROCA	NÚMERO DE GOLPES	RESULTADOS DEL SPT Y RQD	RESULTADOS DE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN						
								● NÚMERO DE GOLPES/PIE ▒ % RQD	ω (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP	PROPIEDADES INDICE (%) ○ LP — ω ● LL ○● IP	GRANULOMETRIA (%) GRAVA ARENA FINOS	Gs	γ (t/m³)	Su (kg/cm²)	φ (°)
81			M-49		ARENA media a fina arcillosa, marrón y gris (SC) Con lentes de arena arcillosa y presencia de grava fina (cuarzo) a 80.50 m ARCILLA de baja plasticidad arenosa con pequeños fragmentos de esquisto blando, marrón (CL)		74	● 74	13						
82															
83															
84			M-50				80	● 80	14	● 16 ● 32					
85															
86															
87															
88			Rbx-52		PEÑONES de arenisca de textura fina con presencia de vetas de cuarzo, gris y rojizo										
89															
90			Rbx-53												
91					ARENISCA de textura fina con vetas de cuarzo, gris y rojizo										
92															
93															
94															
95															
96															
97															
98															
99															

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general del proyecto

GISCA atendiendo la solicitud de parte de FUNVISIS para ejecutar la construcción de dos (2) pozos que permitan la instalación de instrumentos de supervisión geofísica y otro pozo para evaluar las características geotécnicas presentes en el subsuelo dentro del marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica en la Ciudad de Cabudare, realizó en el área perteneciente al Núcleo de Postgrado de Agronomía (NPA) de la Universidad Centro-Occidental “Lisandro Alvarado” (UCLA) ubicado en la ciudad de Cabudare, los trabajos que se describen en el presente informe.

Las perforaciones se ejecutaron en la región occidental de la ciudad, en el sector Tarabana, específicamente dentro de las instalaciones del NPA - UCLA, ubicado entre la redoma de Agua Viva y la Urbanización Chucho Briceño justo en frente de la Urbanización Terepaima, Municipio Palavecino del estado Lara.

El trabajo de campo consistió en las operaciones necesarias para la construcción de los dos (2) pozos geofísicos antes mencionados; uno de ellos con el objetivo de alcanzar roca, con una profundidad final de 300 m y el otro hasta 38 metros de profundidad. El tercer pozo (geotécnico) tiene por objetivo la recuperación de muestras de suelo las cuales están siendo evaluadas en laboratorio para así poder definir las propiedades geotécnicas, tanto estáticas como dinámicas del perfil de suelo. Esta perforación alcanzó la profundidad de 30 m por requerimientos del cliente.

1.2 Alcance de las actividades

El alcance de los sondeos geofísicos y geotécnicos fue realizado tomando en cuenta las especificaciones entregadas por FUNVISIS y contempla los siguientes aspectos:

- Ejecución de una perforación geofísica somera de 8 ¾” de diámetro hasta una profundidad que permita realizar mediciones geofísicas hasta unos 37 m profundidad, considerando que el acelerómetro mide 1 m de longitud.
- Instalación de tubo de PVC de 4” con punta cerrada hasta la profundidad final de la perforación geofísica somera y colocación de una lechada de cemento en el espacio anular entre el terreno y el tubo de PVC para garantizar la transmisión de las ondas sísmicas hasta el instrumento de medición.
- Ejecución de una perforación geofísica profunda de al menos 10” de diámetro hasta una profundidad que permita instalar un instrumento de medición geofísica unos 10 metros dentro del estrato de roca.
- Instalación de tubo de PVC de 4” hasta la profundidad final de la perforación geofísica profunda y colocación de una lechada de cemento en el espacio anular entre el terreno y el tubo de PVC para asegurar la transmisión de las ondas sísmicas hasta el instrumento de medición.

- Ejecución de una perforación geotécnica hasta una profundidad que permita la ejecución del ensayo de penetración estándar (SPT) y/o recuperación de muestras para la caracterización estática y dinámica del perfil de suelos, la cual fue estimada en unos 30 m de profundidad aproximadamente.
- Ejecución e interpretación de ensayos de laboratorio geotécnicos sobre muestras de suelo obtenidas en los sondeos geotécnicos y caracterización de las propiedades físicas y de resistencia de los suelos que conforman el perfil geotécnico en el área, cuyos resultados serán entregados en un documento complementario al presente informe una vez realizados los ensayos dinámicos de laboratorio correspondientes.

1.3 Objetivo del informe

El objetivo de este informe es presentar en forma resumida los resultados de las actividades de campo correspondiente a la ejecución de las perforaciones mencionadas en el alcance de las actividades, descritas en el apartado anterior.

Es importante resaltar que la información correspondiente a los resultados de laboratorio propuestos para las muestras recuperadas en la perforación geotécnica será entregada en el informe final de laboratorio correspondiente al proyecto.

La presentación y discusión de esta información incluye los siguientes aspectos:

- Descripción de la geología general del área.
- Descripción de los trabajos de campo y equipos utilizados.
- Descripción del perfil litológico inferido de la perforación de los pozos para la colocación de los instrumentos geofísicos (*in situ*).

2 GEOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA EN ESTUDIO

Las perforaciones denominadas como P-4, P-5 y P-6 se ejecutaron en la zona occidental de la ciudad de Cabudare, en el sector Tarabana, específicamente en el Núcleo de Postgrado de Agronomía de la Universidad Centro-Occidental “Lisandro Alvarado”.

Esta ciudad se encuentra asentada sobre un valle amplio limitado por el extremo nor-oriental de la Cordillera de los Andes Venezolanos y la Cordillera Caribe. En la región afloran rocas de edades comprendidas entre el Cretácico Temprano hasta el Cuaternario. Estas unidades litoestratigráficas son descritas en la Tabla 1 en orden cronológico depositacional de una secuencia normal.

Según GARCIA *et al.* (1977), el Surco de Barquisimeto, tal como se le conoce a la secuencia depositada durante el período previo al desarrollo del sistema de deformación y callamiento rumbo-deslizante de Boconó, presenta caracteres estratigráficos y estructurales particulares. En ella se tienen secuencias *flysch* Paleoceno-Eoceno inferior sobre unidades Cretácicas levemente metamorfizadas que afloran tanto al sur de la Falla de Boconó (Serranía de Portuguesa) como al norte (área El Tocuyo-Carora- Barquisimeto). El contacto entre la

secuencia tipo *flysch* y la secuencia Cretácica-Eocena es de naturaleza discordante, de tipo angular; generándose un *hiatus* o pérdida de información del registro geológico en el área. La cual, puede ser asociada a levantamientos y posterior deformación de las unidades de roca sedimentarias.

Desde el punto de vista tectónico, en las cercanías de la ciudad de Barquisimeto, cruza la Falla de Boconó, esta es una falla transcurrente de orientación noreste y posee movimiento rumbo deslizante dextral. Actualmente esta falla esta activa y es la principal generadora de la sismicidad en la zona. Sobre este tema comentan GIRALDO y AUDEMARD (1999) al sistema de fallas rumbo deslizantes-dextrales Boconó, San Sebastián, El Pilar y Oca-Ancón, que se encuentra a todo lo largo del norte de Venezuela, como un sistema que acomoda un desplazamiento de 150 km a lo largo del mismo, siendo la Falla del Boconó la que acumula tan solo entre 30 y 35 km de desplazamiento en la dirección del rumbo.

Este sistema evidencia una tectónica compresional que inicia hacia el Mioceno medio y es activo hasta el Reciente. El mismo, es responsable de una gran cantidad de eventos sismológicos de magnitud variable durante su historial sísmico.

En la Tabla 1 se describen de “Tope a Base” en forma resumida la litoestratigrafía de las unidades que están presentes en el área de estudio y zonas adyacentes. Cabe destacar, que se describen inicialmente las unidades más jóvenes y se concluye con las unidades más antiguas. Esto con el fin de darle al lector una idea del registro sedimentario y tener un control de la estratigrafía descrita en el área de estudio, siguiendo una secuencia *normal* de depositación durante el registro de sedimentación de la cuenca tracción de Cabudare.

Por lo citado anteriormente por GIRALDO y AUDEMARD (1999) las unidades Pre-miocenas pueden ser consideradas como basamento o zócalo de la cuenca. Cabe destacar que solo por factor de erosión durante la exposición de las mismas hace que encuentren indistintamente a lo largo y ancho de la cuenca e inclusive por debajo de esta. Con lo que se puede entender que este Basamento puede variar entre rocas sedimentarias y metamórficas, donde las primeras corresponden a las formaciones Bobare, Matatere y Morán y las segundas a las formaciones Mamey y Barquisimeto, descritas de forma resumida en la Tabla 1.

Así mismo, se considera a las unidades Miocenas y Post-miocenas como las que conforma el registro de sedimentación que rellenan la cuenca y contienen el registro de deformación causado por el sistema de fallamiento predominante en el área. Consecuentemente las formaciones litoestratigráficas descritas en la Tabla 1 que son incluidas en esta característica serían la Formación El Pegón y las unidades Cuaternarias denominadas como Q, en sus distintas facies.

Tabla 1. Resumen de Unidades Litoestratigráficas

Formación		Edad	Espesor (m)	Descripción
Qs	Q ₀ -Q ₁ (*)	Pleistoceno superior-Reciente	10-40	Según GIRALDO y AUDEMARD (1997) los sedimentos mas recientes están constituidos por las arenas y conglomerados. Geomorfológicamente, corresponden a zonas de topografías bajas, a ambos lados de los cursos actuales de los ríos Turbio y Claro.
	Q ₂ -Q ₃ (*)	Plioceno.	10-35	Igualmente descritas por GIRALDO y AUDEMARD (1997) hacia la base de esta secuencia, se han reconocido por primera vez, intervalos lacustres (varvas), que podrían corresponder al inicio de la apertura de la cuenca de tracción. En discordancia angular sobre los sedimentos pliocenos, descansan los conglomerados del pleistoceno inferior, sobre los cuales ha sido construida parcialmente la ciudad de Barquisimeto. Estos sedimentos, se encuentran bien expuestos a lo largo de la avenida La Ribereña, y de la carretera nueva de va desde Barquisimeto hacia Cabudare, correspondiendo a rampas detríticas o glacis, de pendientes muy suaves hacia el norte (<5°).
El Pegón		Mioceno – Plioceno	100	Según el CIEN (1997) está formada por gravas, con cantos de hasta 25 cm, presenta cierta estratificación, y al meteorizar es de color amarillo a naranja, además están interestratificadas con capas gruesas y lentes de arenas arcillosas, friables, de color blanco a marrón claro y arcillas de color gris claro a gris azulado, con tintes marrón.
Moran		Paleoceno – Eoceno	500	CIEN (1997) describe a esta unidad como areniscas, lutitas y lentes menores de calizas. El Miembro Lutitas de El Tocuyo, en su base es una lutita de color gris que pasan a negras, marrón-verdoso y en el tope en color es rojo vino tinto, amarillo, negro y gris verdoso. El Miembro Areniscas de Botucal, consiste en ortocuarcita de color blanco a crema, que pasa a amarillo o marrón rojizo.
Matatere		Paleoceno – Eoceno	3000	Menciona el CIEN (1997) que esta unidad consiste en turbiditas, con varios horizontes de areniscas conglomeráticas y conglomerados líticos, estas rocas se componen de cuarzo, feldespato, micas y fragmentos líticos de composición variable, caliza, filita, esquisto, cuarcita, lutita y en menor proporción, rocas volcánicas y gneises.
Barquisimeto		Cenomaniense - Maastrichtiense	1700	CIEN (1997) menciona que esta unidad esta compuesta por en lutitas, limolitas, margas compactadas, ftanitas y calizas de color gris oscuro a negro en estado fresco y tonos muy claros de gris al meteorizar. Los porfidoblastos de pumpellita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo.
Bobare		Barremiense – Albiense	1700	Según CIEN (1997) esta unidad consiste esencialmente de areniscas cuarzosas de color gris oscuro, gris claro o crema en estado fresco y meteorizan a rojizo, de grano entre muy grueso y conglomerático y lutitas y limolitas de color gris oscuro en estado fresco y meteorizan a gris claro, amarillento, marrón verdoso y purpurino; son frecuentes las lentes delgadas y las concreciones de material ferruginoso.
Mamey		Cretácico Temprano	1400	CIEN (1997) describe a esta unidad que consiste esencialmente de esquisto cuarzo – sericítico con colores gris, naranja y marrón, en capas generalmente lenticulares, de espesores variables; metaconglomerado de colores crema a gris claro, intercalados con los primeros, con fragmentos que alcanzan dimensiones de guijarros, peñas y peñones de mármol, filita y arenisca; metaconglomerado calcáreo arcósico y mármol arenáceo conglomerático arcósico; metaarenisca generalmente calcárea y feldespática y filita negra grafitosa, localmente calcárea.
Nota (*): las unidades descritas por GIRALDO y AUDEMARD (1997) son unidades informales que describen la sedimentación del cuaternario en el área de Barquisimeto y sus alrededores y no se encuentran reconocidas aun en el Léxico Estratigráfico de Venezuela ni por el CIEN, Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura de PDVSA.				

3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1 Perforación geotécnica

El sondeo geotécnico fue la primera perforación en realizarse en sitio, con recuperación de muestra que nos permita identificar las características y espesor del sedimento en sitio.

La perforación geotécnica se realizó con un equipo de perforación de pozos geotécnicos, marca Sprague Henwood C40 y cuyas características principales son:

- Sistema de perforación hidráulico montado sobre Skid
- Sistema de ensamble de mástil para SPT.
- Sistema de bombeo
- Motor reductor para el control de rotación.

3.1.1 Ejecución de la perforación geotécnica y muestreo

Se realizó una perforación geotécnica convencional utilizando percusión y lavado en las zonas donde el número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_{SPT}) fuese menor a 80, y rotación o perforación combinada para aquellas zonas duras o densas con avances controlados a cada 0,50 m para verificar el tipo de material que se estaba perforando, material que en la mayoría de los casos correspondía a parte de esquistos transportados como material coluvial y/o aluvial meteorizado.

La técnica de percusión y lavado permitió la toma de muestras perturbadas utilizando un muestreador de tipo cuchara partida a intervalos de un metro de profundidad. A medida que se profundizaba se colocó una camisa protectora o forro Bx (76 mm aprox).

Las muestras perturbadas se colocaron en frascos plásticos con tapas selladas herméticamente y fueron identificadas señalando el nombre del proyecto, número de perforación, fecha, número de muestra y profundidad, longitud de recuperación y resistencia a la penetración normal (N_{SPT}), en el caso de haberse hecho este ensayo. Estas muestras fueron almacenadas cuidadosamente y transportadas al laboratorio para sus respectivos análisis.

Simultáneamente a la toma de muestras perturbadas, se realizó el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) que consiste en hincar en el subsuelo un tubo muestreador de pared gruesa ó cuchara partida de 2" de diámetro exterior (5,08 cm) y de una longitud mínima de 2 pies (60 cm) utilizando la energía que provee los golpes de un martillo de 63,5 kg (140 lb) con una caída libre de 76 cm. El número de golpes necesarios para hincar el tubo muestreador los últimos 30 cm en el terreno de un total de 45 cm de penetración, es lo que se conoce como resistencia del suelo a la penetración (N_{SPT}), estableciéndose la densidad relativa en los suelos granulares y la consistencia en los suelos cohesivos (ASTM D-1586).

La información correspondiente a los resultados de laboratorio propuestos para las muestras recuperadas en la perforación geotécnica serán entregados en el informe final del proyecto.

3.1.2 Descripción del perfil geotécnico idealizado e interpretado a partir de los ensayos de campo

El perfil geotécnico del área estudiada hasta los 30 m de profundidad, se puede inferir en forma preliminar utilizando la descripción visual de las muestras de suelo recuperadas en campo y los resultados de las pruebas *in situ*. Estas propiedades serán ajustadas con base en los resultados de los ensayos de laboratorio.

Perforación P-4

Profundidad de perforación SPT: 30 m

En la perforación geotécnica P-4, las pruebas de Ensayo de Penetración Estándar (*SPT*) comprueban el grado de heterogeneidad de los depósitos aluviales ya que los sedimentos mostraban un muy bajo grado de diagénesis y una gran variedad de tamaño de grano. Fue muy común encontrar clastos de una mineralogía cuarzo muscovítica con textura reliquia esquistosa, moteado blanco, amarillo y marrón. Estos clastos se meteorizaban a arcilla micácea, o a arena fina limosa micácea en el caso de los clastos con textura gnéisica.

La abundancia de estos clastos, así como la presencia de fragmentos de cuarzo dificultaban el avance de la cuchara y la recuperación de muestras de suelo en la prueba *SPT*. A partir de los 9,00 m de profundidad fue indispensable rotar con lavado para avanzar en profundidad.

En general, las facies presentes corresponden a capas conglomeráticas con una matriz principalmente arenosa. El grado de escogimiento es pobre y los clastos varían en tamaño y forma. Presentan un bajo grado de diagénesis, ya que el sedimento está poco consolidado. Sin embargo, hay una interpretación no adecuada arrojada por los números de golpes registrados en el ensayo *SPT*, porque existe una abundancia de fragmentos de cuarzo y de peñones de esquistos poco meteorizados a meteorizados que generó resistencia a la penetración de la cuchara.

3.2 Pozos para geofísica

El programa de perforaciones para la instalación de equipos geofísicos consistió en la ejecución de dos (2) pozos, un primer pozo (denotado como P-5) con una profundidad de 38 m, de los cuales 37.10 m son libres para medición; y un segundo pozo (denotado como P-6), el cual alcanzó los 300 m de profundidad de los cuales 295.15 m de profundidad son libres para medición.

En el pozo P-6, después de haber examinado las muestras recuperadas desde los 261 m y los 291 m de profundidad, representantes técnicos de GISCA y FUNVISIS llegaron a la conclusión que a partir de los 284 m se presenta una roca meteorizada, observándose fragmentos esquistosos y la orientación de los minerales y que aproximadamente a los 290 m comienza el tope roca, por lo que la profundidad final de la perforación se estableció en 300 m.

El equipo de perforación utilizado para la realización de estos pozos fue una máquina de perforación rotatoria marca Ingersoll Rand, modelo T4, cuyas especificaciones se presentaron en la propuesta realizada por GISCA a FUNVISIS.

Este equipo fue movilizado al sitio de trabajo y luego de dar acondicionamiento al área y conectar el equipo de bombeo, realizar la fosa de mezclado y circulación del lodo bentonítico

de perforación, conectar las mangueras, etc.; se dio inicio a las operaciones de perforación en el sitio.

El circuito cerrado de lodo de perforación estuvo conformado por un depósito o canal para la circulación del fluido en superficie durante la perforación y un depósito o fosa para la sedimentación de los sólidos.



Durante el proceso de perforación y de acuerdo con las necesidades de almacenamiento en sitio, los sólidos de perforación fueron transportados a un área determinada para este fin de manera provisional y posteriormente a un botadero para la disposición apropiada de estos materiales. Esto permitió mantener el área de operaciones con el mínimo impacto ambiental.

El avance de la perforación se realizó mediante uso de una broca de 8 3/4", posteriormente se procedió a ensanchar el hueco, utilizando brocas de 9 7/8" y 12" de diámetro, hasta alcanzar la profundidad deseada.

Este nuevo diámetro permite realizar el entubado apropiado del pozo con tubería de PVC de 4" de diámetro, resultando un menor porcentaje de material de derrumbe durante la operación.

La perforación de 38 m (P-5) se realizó utilizando un sistema de rotación con circulación directa de lodo bentonítico base agua con una broca o mecha de 8 3/4" de diámetro, al alcanzar la profundidad final se realizó la ampliación del hoyo con mecha de 9 7/8" de diámetro con el objetivo de facilitar el manejo de la tubería de PVC de 4" en el proceso de entubado.

La perforación de 300 m (P-6) se realizó utilizando un sistema de rotación con circulación directa de lodo bentonítico base agua con una broca o mecha de 8 3/4" de diámetro hasta una profundidad de 180 m, luego para evitar posibles derrumbes y altas presiones en la bomba de lodo, se procedió a ampliar el hoyo a un diámetro de 9 7/8" y posteriormente a 12". La perforación continuo hasta su destino final de 300 m con la broca de 8 3/4" de diámetro y al alcanzar el fondo se procedió a ampliar el hoyo con la broca de 9 7/8" de diámetro y así obtener finalmente un hoyo de 300 metros de profundidad de sección telescópica.

La determinación de ampliación del hoyo en el pozo de 300 m, de 9 7/8" a 12" hasta aproximadamente 180 m, y de 8 3/4" a 9 7/8" de diámetro, hasta alcanzar el fondo de la perforación, se debió además de los requerimientos establecidos dentro de los procedimientos de perforación, al repetido atascamiento de las barras de perforación al intentar extraer las mismas para posteriormente colocar de la tubería de PVC de 4". Esta situación pudo haberse generado por la característica de los materiales del sitio (presencia de arcilla con características expansivas) y la presencia de acuíferos a diferentes profundidades.

A medida que se avanzaba en profundidad, se densificó el lodo de perforación, de manera que permitiese el avance de la misma, solventando posibles problemas de derrumbes, corrimientos de agua y expansividad del material arcilloso presente en el pozo.



Una vez alcanzada la profundidad final del hoyo, se mantuvo circulando el lodo de perforación dentro del pozo con el objetivo de sacar la mayor cantidad del ripio de perforación que aún quedara en suspensión dentro del lodo que está en el hoyo y que pudiera sedimentarse dentro del mismo. Adicionalmente, y como se mencionó anteriormente, se continuó unos 8 m por debajo de la cota programada de asiento de la perforación de 30 m y unos 10 m por debajo de la cota programada para la perforación de 290 m, con la finalidad de compensar la sedimentación de los ripios que no puedan ser eliminados durante la circulación del pozo y las condiciones de borde exigidas por el proceso de medición geofísica en roca.

Para el entubado de los pozos se utilizó un tubo de PVC de 4" Schedule 80 con centralizadores colocados a cada 6 m para los pozos P-5 y P-6.



Esta tubería es colocada utilizando el equipo de perforación como guía sujetando el tubo PVC en superficie para garantizar la seguridad de la operación durante el proceso de ensamblaje de los tramos consecutivos y posterior cementación del anular entre el tubo de PVC y el hoyo de perforación. Para el pozo profundo se utilizó lodo dentro de la tubería para disminuir el empuje ejercido por el lodo del pozo en sentido contrario al descenso de la tubería, sometiendo a presiones equilibradas la tubería de PVC a medida que se profundiza.

Es de hacer notar, que el procedimiento de entubado utilizado en los pozos P-5 y P-6, es similar al empleado en esa fase correspondiente a los Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en las ciudades de CARACAS, BARQUISIMETO y CABUDARE, para el proyecto de MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LAS CUIDADES DE CARACAS Y BARQUISIMETO, empleándose como mínimo los materiales indicados en las especificaciones para la ejecución del trabajo.

En el caso específico de la P-6, el entubado fue realizado bajo la inspección del representante de FUNVISIS en sitio, corroborándose la inserción del tubo PVC de manera fácil y directa hasta la profundidad de 295.65 m, presentándose sedimentación al final del pozo de aproximadamente 4 m.

Una vez alcanzado el entubado la profundidad de 37.55 m en P-5 y 295.65 m en P-6, se procedió a dar inicio al proceso de cementación, consistiendo en la inyección de una lechada compuesta por agua-cemento-bentonita. Cada mezcla fue preparada con aproximadamente 13 a 14 sacos de cemento tipo A o B y 35 kg de bentonita por cada metro cúbico de agua.

Esta mezcla fue inyectada desde la superficie a través de una tubería de acero de 1 ¼" de diámetro, la cual en un principio se encontraba a la profundidad máxima del pozo y

posteriormente con cada vaciado fue siendo extraída por tramos proporcionalmente al volumen de lechada inyectada, hasta alcanzar la superficie.

En el caso específico de la P-6, el cementado fue realizado bajo la inspección del representante de FUNVISIS en sitio.

Una vez culminado el proceso de cementación, el tubo de PVC es protegido en superficie para evitar cualquier movimiento no deseado durante el fraguado del cemento. El exceso de agua y lodo en la tubería se intentó remover en su totalidad utilizando un sistema de bombeo neumático diseñado para tal fin. Este trabajo solo fue logrado en el pozo P-5.

Durante la limpieza del pozo P-6 se efectuó el mismo procedimiento, no logrando el objetivo de extraer en forma total el líquido presente dentro de la tubería, alcanzándose la profundidad de 275 m. Dejando el sistema en reposo, se evidenció la recuperación del nivel del fluido dentro de la tubería de PVC, obligando a extraer la tubería de limpieza a nivel superficial que permitiese nuevamente la extracción por etapas del líquido.

Luego de sucesivos intentos por extraer el líquido alojado dentro de la tubería de PVC, se evidenció lo dinámico de la recuperación del nivel de agua dentro del pozo, así como el continuo volumen de agua que se lograba expulsar con presencia de sedimentos granulares de características subredondeadas y angulares que no pertenecían a la mezcla de lodo introducido en el PVC durante el proceso de entubamiento.



Esta situación obligó a considerar el uso de un dispositivo especial tipo cámara, que permitiera obtener un registro (filmación) y realizar una evaluación de la condición presente en el pozo P-6. Este registro permite inspeccionar el estado técnico-físico del pozo, mostrando imágenes en tiempo real.

El empleo de la misma permitió observar que a la profundidad aproximada de 281 m se evidenció un acuífero con un flujo grande y continuo de agua, afectando considerablemente la sección del pozo, lo que trae como consecuencia que sea imposible el hecho de achicar

toda el agua contenido dentro del mismo y así poder secarlo para la posterior colocación del instrumento geofísico.

Esta avería fue descubierta gracias al uso de una cámara especializada, permitiéndolo observar la magnitud del suceso.

3.2.1 Litología inferida de las perforaciones de pozos geofísicos

Perforación P-5

Profundidad de perforación: 38.00 m

Profundidad libre de la tubería de PVC, para las mediciones: 37.10 m

El muestreo del pozo fue realizado metro a metro desde el inicio hasta el final. Con lo cual se puede llegar a identificar la variabilidad del tamaño de grano de los sedimentos atravesados a medida que se avanza en profundidad, como los descritos a continuación:

La litología observada durante la perforación del pozo P-5, desde su tope hasta su base son sedimentos donde predominan las gravas y arenas sobre los limos y arcillas. Esto indica que los sedimentos se encuentran dentro de un ambiente de alta energía e igualmente se encuentran espacialmente ubicados muy cercanos al lugar de procedencia la fuente de los mismos.

Por la ubicación geográfica del pozo respecto a las unidades litoestratigráficas que se encuentran distribuidas en los alrededores de la Población de Cabudare y la profundidad final alcanzada (38.00 m), se puede concluir que la secuencia esta identificada con los sedimentos depositados durante el Plioceno hasta el Cuaternario, sin poder identificar ninguna barrera entre las edades de depositación, denominados como Q en la Tabla 1 del Aparte 2.

Perforación P-6

Profundidad de perforación: 300.00 m

Perforación con infiltración de un acuífero dentro del pozo a la profundidad aproximada de 281 m.

El muestreo del pozo fue realizado metro a metro desde el inicio hasta el final. Con lo cual se puede llegar a identificar la variabilidad del tamaño de grano de los sedimentos atravesados a medida que se avanza en profundidad, como los descritos a continuación.

La litología observada durante la perforación del pozo P-6, desde su tope hasta su base, son sedimentos que puede ser diferenciados en 3 unidades, donde cada unidad es definida por el predominio de un tamaño de grano sobre los otros. Las mismas son descritas a continuación:

- La primera unidad donde *predominan las gravas y arenas* sobre los limos y arcillas como fue observada igualmente en el pozo P-5, tiene un espesor entre superficie y 160 m.
- La segunda unidad observada se encuadra entre los 160 m y 262 m. Se observa un cambio abrupto donde *predominan las facies arcillosas-limosas* sobre las gravas y las arenas, que puede ser identificada con los estados iniciales de depositación de la cuenca de tracción de Cabudare. Al tomar en cuenta el espesor en proporción al tamaño de grano de los sedimentos, se puede decir que: estos se encuentran dentro de un ambiente de baja energía e igualmente se encuentran espacialmente ubicados lejos al lugar de procedencia la fuente de los mismos.
- Y por ultimo, la tercera unidad en la que “*predominan las facies de Gravas-arcillosas*” no tiene una barrera precisa con la facie anterior por encontrarse dominada igualmente por arcillas. Pero si se pueden identificar en esta unidad los fragmentos de roca que pueden ser sedimentarias hacia su tope, siendo de difícil distinción. Por otro lado, hacia su base se encuentran rocas metamórficas, en donde si se logró identificar *la roca* a una profundidad de 290 m. Este juicio en cuanto al tipo y calidad de roca fue realizado en campo en forma conjunta entre el personal de GISCA y el personal de FUNVISIS.

3.3 Identificación de la roca

Según lo descrito en el Aparte 2, las unidades de rocas que se encuentran en los alrededores de Cabudare son principalmente de dos tipos, Sedimentarias y Metamórficas. Las del primer tipo pueden encontrarse, según sea el caso, de forma indistinta como parte del registro sedimentario o del basamento de la cuenca. Solo dependerá de la edad de la roca. Si ésta, es pre-miocena, como se comentó anteriormente en el aparte 2, formará parte del zócalo de la cuenca de tracción de Cabudare. Esto último, hace que sea difícil el reconocimiento de este caso, por cuanto no se realiza un estudio in situ que identifique la edad de la roca, sino solo se realiza una descripción visual de la muestra que se encuentra dentro de una matriz “arcillosa-lodosa” por el cual es transportada hasta la superficie en forma de “ripios o fragmentos de roca”.

Por otro lado, las del segundo tipo se encuentran únicamente en el basamento de la cuenca. Lo que las hace un indicativo preciso e indiscutible de haber atravesado todo el registro post-plioceno el cual se cree que fue rellenada dicha depresión.

También se tuvo en consideración el estado en que se preserva el ente rocoso y estos se listan a continuación, del más alterado al mejor preservado:

- El suelo residual (residual, aluvial, paleosuelo, coluvial, glacial y loess). Es formado como consecuencia de la descomposición de una roca y este no ha sido transportado, o sea, permanece *in situ*.
- Roca muy meteorizada
- Roca meteorizada. Estas preservan algunos rasgos de la roca origen, pero se encuentran descompuestas en las zonas expuestas a la intemperie.
- Roca Fresca.

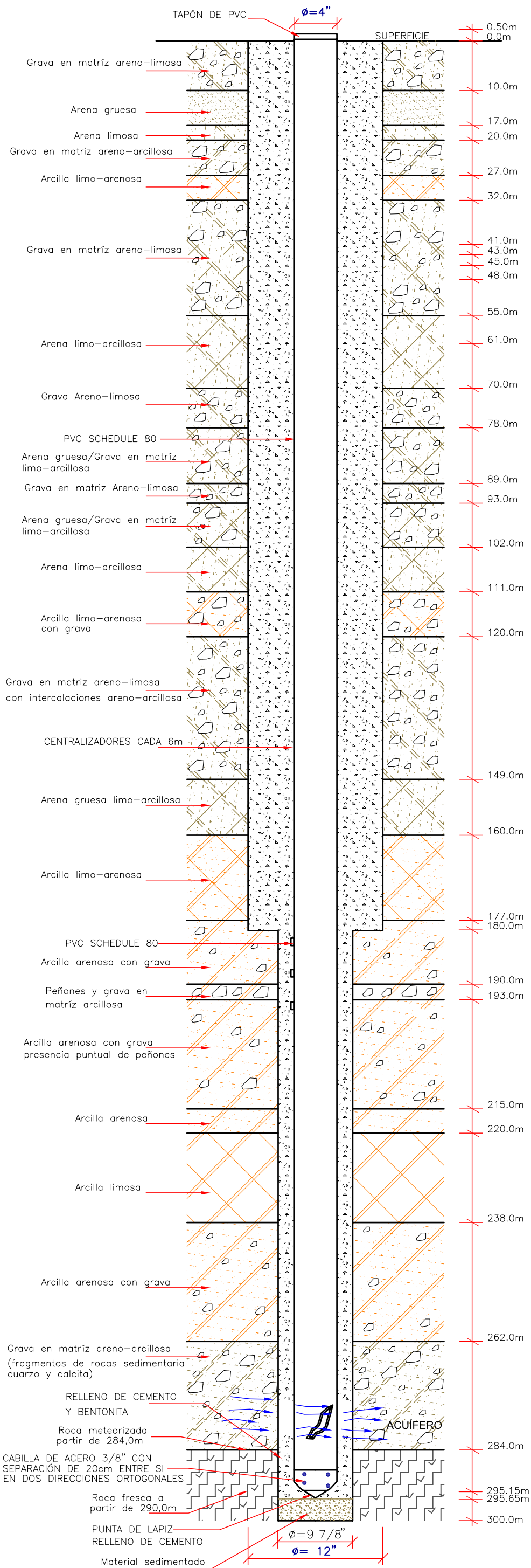
Se entiende que el proceso de perforación realizado, no altera al material rocoso como para que el mismo entre en la clasificación anterior. Este proceso, únicamente lo fracciona en elementos más pequeños, que pueden ser transportados según la densidad del fluido de lodo que se hace circular dentro del pozo.

Por ende se entiende que, el proceso de identificación de la roca fresca estuvo soportado tanto por el cambio de las características de la mecánica de perforación, como por las características geológicas de los cortes de perforación, y la información obtenida de los afloramientos de roca observados en los alrededores del sitio de trabajo.

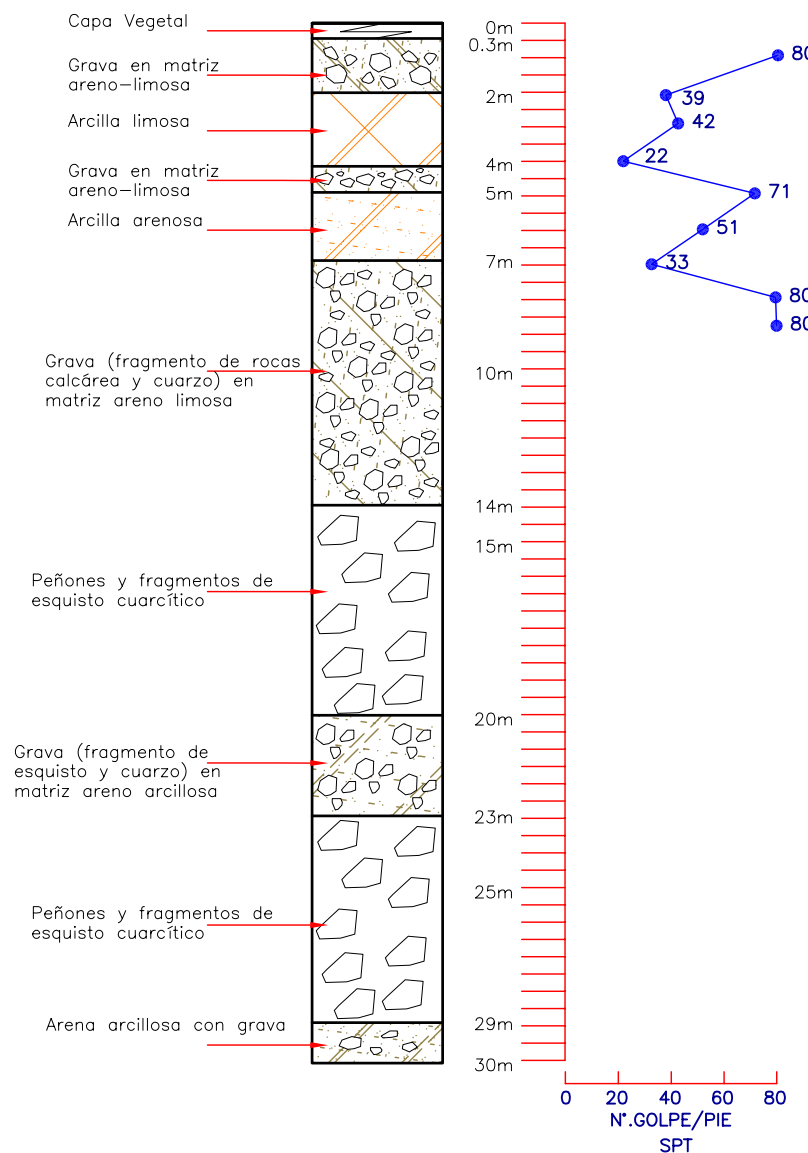
En conclusión el objetivo es identificar una roca de tipo metamórfica, de textura esquistosa y que se pudiese considerar en buenas condiciones o de calidad óptima, roca fresca.

En una primera aproximación se utilizó la mecánica de la perforación como el primer marcador de la presencia de un estrato duro de consistencia similar a un estrato de roca. Si las características mecánicas se lograban mantener más allá de unos 6 a 8 m de profundidad para evitar que se estuviese perforando en un bloque de roca aislado en el aluvión, entonces se procedía a verificar las características mineralógicas del material para asegurar que fueran propias de una roca fresca. Este procedimiento permitió identificar el estrato de roca a unos 290 m de profundidad aproximada.

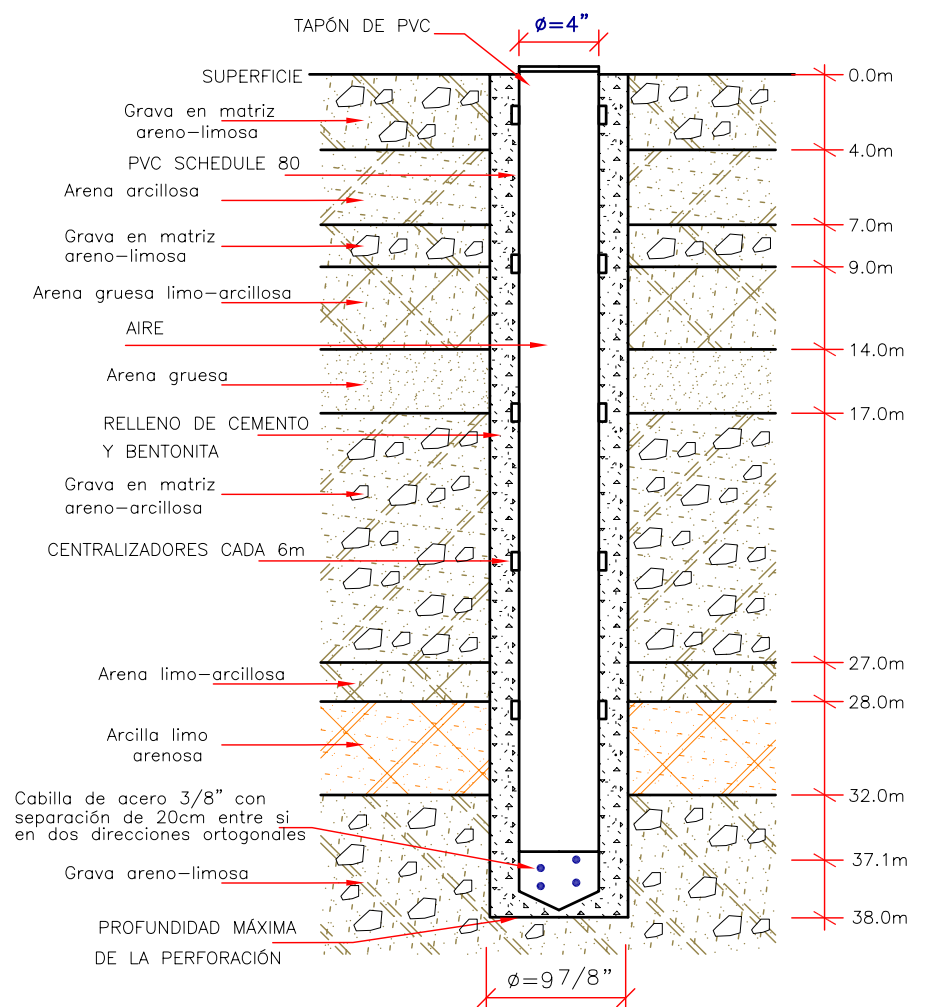
En la Figura 1, se presenta en resumen, el perfil litológico obtenido de la perforación geotécnica (P-4) y la litología inferida de las perforaciones de pozos geofísicos (P-4 y P-5).



PERFORACIÓN P-6



PERFORACIÓN P-4

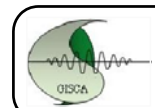


PERFORACIÓN P-5



Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Cabudare, Venezuela.
Núcleo de Postgrado de Agronomía de UCLA, Edo. Lara.
PERFIL LITOLÓGICO CON ESQUEMA
GENERALIZADO DE LOS SONDEOS P-4, P-5 y P-6

Diseñado por: F.ZIRITT	Dibujado por: JG.MEJIAS	Fecha: DIC/2006	Figura N° 1
Revisado por: A.PEREZ	Proyecto N°: P-050566	Escala: S/E	Revisión N° 0
Aprobado por: P.MARINARO	Archivo N°: ING-FIG-IP-100566-C-001-0		



Geotecnia e Ingeniería Sísmica
GISCA

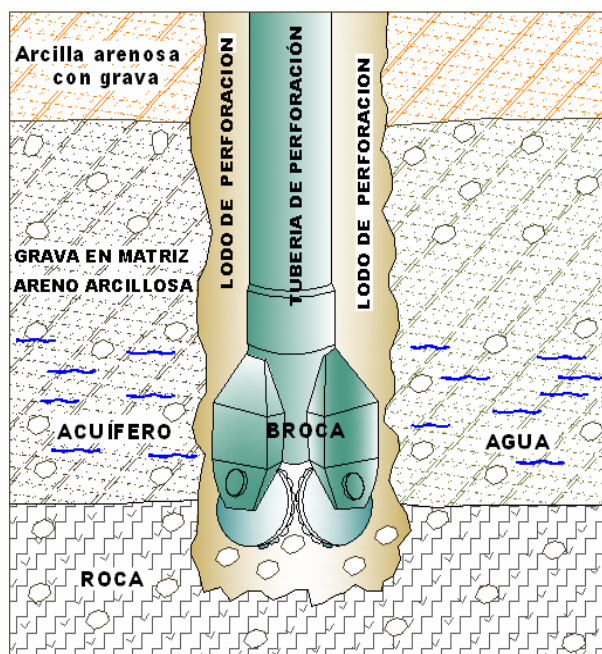
4 ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES

Del análisis de lo expuesto en este informe, en cuanto a la situación del pozo P-6, donde se realizaron los procedimientos y se emplearon los materiales indicados en las especificaciones suministradas por FUNVISIS, se concluye que la afectación de la sección del pozo a los 281 m es debido a la presencia de acuíferos de flujo grande y continuo, influenciado por las condiciones geológicas, geotécnicas e hídricas de la zona, donde se presentan estratos de gravas gruesas y clastos por debajo de los 262 m y que profundizan hasta alcanzar el interfaz con el tope de roca a los 290 m y las posibles zonas de recarga (cabecera de ríos), límites y características de los acuíferos presentes en sitio.

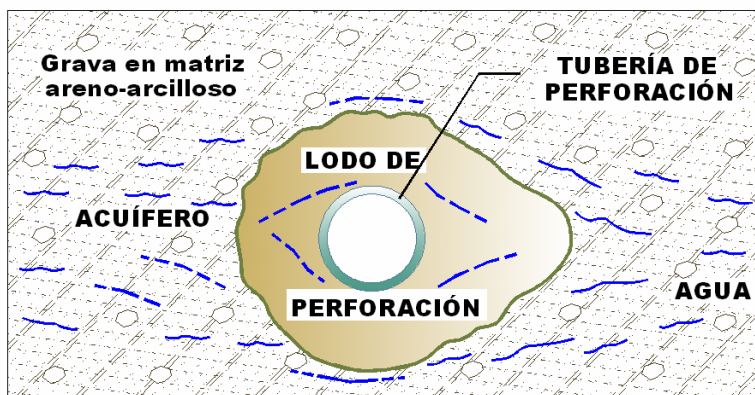
Tal como se comentó en el aparte 3.2 del presente informe, la realización del pozo P-6 (profundidad final 300 m) se llevó a cabo utilizando un sistema de rotación con circulación directa de lodo bentonítico, obteniéndose un hoyo de sección telescópica (ver Figura 1).

La sección telescópica y la densificación del lodo de perforación, a medida que se avanzaba en profundidad, se realizó como práctica común, de manera de evitar posibles derrumbes de las paredes y mitigar los efectos de la presencia de material arcilloso potencialmente expansivo detectado entre 160 - 262 m.

El ensanchar el hoyo y la densificación y circulación continua del lodo, permitió el avance de la perforación en profundidad, pasando la sección del pozo (~ 281 m), donde posteriormente se identificaría la presencia de un acuífero de flujo grande y continuo (mediante el empleo de un dispositivo especial tipo cámara una vez entubado el pozo con tubería PVC), hasta llegar a la roca meteorizada a los 284 m, tope de roca fresca a los 290 m y finalizar la perforación a los 300 m.



Así mismo, durante la perforación, dado lo espeso y el continuo bombeo de lodo, no se presentó pérdida en el nivel de la fosa de lodo, estimándose un comportamiento similar al indicado en planta en la siguiente figura:

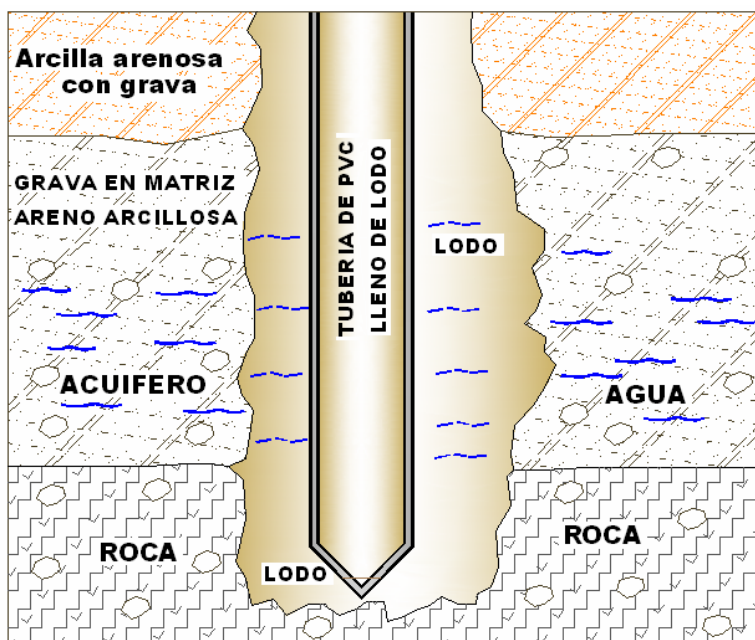


El flujo de agua correspondiente al acuífero, encontrándose en un medio de características granulares, busca la continuidad de la corriente en el medio permeable, evitando su acción en el sector confinado producto del bombeo continuo del lodo de perforación (espeso) y de la rigidez de la tubería de perforación propiamente dicha.

Por lo antes expuesto y considerando las características del equipo de perforación, durante la ejecución de la misma no se evidenció la presencia de un acuífero de gran magnitud.

Una vez alcanzada la profundidad final del hoyo (300 m), se mantuvo circulando el lodo de perforación dentro del pozo, para posteriormente proceder al entubado del mismo empleando el equipo de perforación como guía sujetando el tubo PVC de 4" Schedule 80 en superficie, para garantizar la seguridad de la operación durante el proceso de ensamblaje de los tramos consecutivos y posterior cementación del anular entre el tubo de PVC y el hoyo de perforación.

Se utilizó lodo dentro de la tubería para disminuir el empuje ejercido por el lodo del pozo en sentido contrario al descenso de la tubería, sometiendo a presiones equilibradas la tubería de PVC a medida que se profundiza. Este proceso además, contribuyó directamente a mitigar el posible efecto del acuífero sobre la tubería PVC, durante la instalación del tubo en el hoyo perforado.



Estando en este punto, el comportamiento del acuífero es similar, a lo expuesto anteriormente, es decir, el flujo de agua, encontrándose en un medio de características granulares, busca la continuidad de la corriente en el medio permeable, evitando su acción en el sector confinado producto del bombeo continuo del lodo de perforación (espeso) y de la tubería de PVC rellena de lodo.

El procedimiento de entubado fue similar al empleado en el proyecto de MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LAS CUIDADES DE CARACAS Y BARQUISIMETO, bajo la inspección del representante de FUNVISIS en sitio, corroborándose la inserción del tubo PVC de manera fácil y directa hasta la profundidad de 295.65 m, presentándose sedimentación al final del pozo de aproximadamente 4 m.



Posteriormente, se inició el proceso de cementación, bajo la inspección del representante de FUNVISIS en sitio, consistiendo en la inyección de una lechada compuesta por agua-cemento-bentonita. Esta mezcla fue inyectada desde la superficie a través de una tubería de acero de 1 1/4" de diámetro, la cual en un principio se encontraba a la profundidad máxima del pozo y posteriormente con cada vaciado fue siendo extraída por tramos proporcionalmente al volumen de lechada inyectada, hasta alcanzar la superficie, no dando indicio ni detectándose anomalía durante el proceso.

Una vez culminado el proceso de cementación y fraguado del mismo, se intentó remover el exceso de agua y lodo dentro de la tubería utilizando un sistema de bombeo neumático diseñado para tal fin.

El proceso de la remoción del exceso de agua y lodo dentro de la tubería PVC, se inició desde superficie empleando una tubería de acero de 1 1/4" de diámetro, añadiendo tramos en la medida que se aumentaba en profundidad, presentándose la particularidad que a diferencia de la limpieza de los otros pozos realizados, no se lograba el objetivo de extraer en forma total el líquido presente dentro de la tubería, alcanzándose la profundidad de 275 m.

A estos efectos, se procedió a la revisión del sistema de bombeo como tal, dejándose en reposo y corroborándose el normal funcionamiento del mismo. Al tratar de iniciar nuevamente la extracción del fluido (agua + lodo) "teóricamente" restante dentro de la tubería PVC por debajo de los 275 m, se evidenció la recuperación del nivel del fluido dentro de la tubería PVC (30 a 40 m medido desde la cota actual del terreno), obligando la extracción de la tubería de limpieza a nivel superficial, que permitiese intentar nuevamente la operación por etapas de bombeo.

Tal como se hizo referencia en el aparte 3.2, luego de sucesivos intentos por extraer el líquido alojado dentro de la tubería de PVC, se evidenció lo dinámico de la recuperación del nivel de agua dentro del pozo, así como el continuo volumen de agua que se lograba expulsar con presencia de sedimentos granulares de características subredondeadas y angulares que no pertenecían a la mezcla de lodo introducido en el PVC durante el proceso de entubamiento.

Esta situación ameritó que se empleara una cámara especializada, que permitió obtener un registro (filmación) y realizar una evaluación de la condición presente en el pozo P-6, mostrando imágenes en tiempo real.

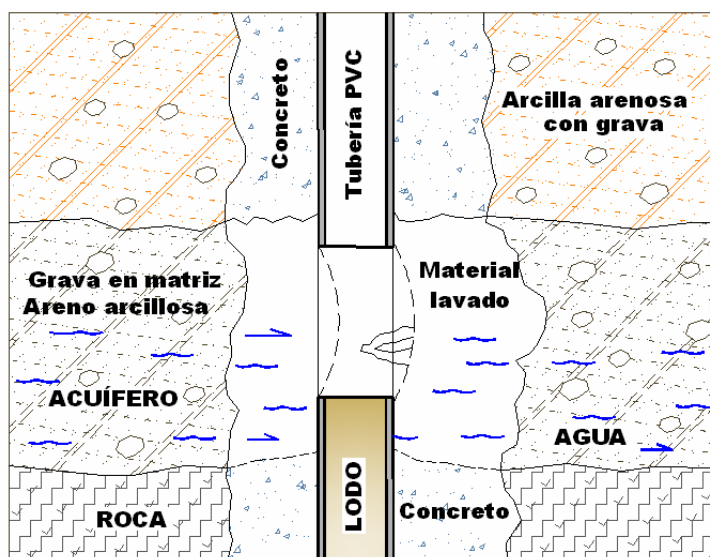
Se observó que a la profundidad aproximada de 281 m existía una avería, evidenciándose un acuífero con un flujo grande y continuo de agua, afectando la sección del pozo, lo que trajo como consecuencia que fuese imposible el hecho de achicar toda el agua contenida dentro del mismo y así poder secarlo para la posterior colocación del instrumento geofísico.

Del continuo análisis y evaluación de lo obtenido en campo y lo observado en la filmación del pozo P-6, se concluye que la afectación de la sección del pozo a los 281 m es debido a la presencia de un acuífero de flujo grande y continuo, influenciado por las condiciones geológicas, geotécnicas e hídricas de la zona, donde se presenta un estrato de características permeables, compuesto por grava (fragmentos de roca sedimentaria, cuarzo y calcita) en

matriz arenosa por debajo de los 262 m y que profundizan hasta alcanzar el interfaz con el tope de roca meteorizada a los 284 m y las posibles zonas de recarga (cabecera de ríos), límites y características de los acuíferos presentes en sitio.

La condición geológica-geotécnica e hídrica reinante en el sitio de exploración (área perteneciente al Núcleo de Postgrado de Agronomía de la Universidad Centro-Occidental “Lisandro Alvarado” - Cabudare), provocó que una vez realizada la fase de cementación del espacio anular entre el terreno y el tubo de PVC, con el fin de asegurar la transmisión de las ondas sísmicas hasta el instrumento de medición, y en la espera del fraguado del mismo (estando en una condición estática), la lechada de cemento-bentonita se viese afectada en la sección del pozo correspondiente a los 281 m por la presencia de acuífero de flujo grande y continuo en una matriz granular de características permeable, limitado adicionalmente por la localización del tope de roca a los 284 m, formando un posible canal de corrimiento de agua, perdiéndose progresivamente el confinamiento alrededor de la sección del tubo afectada (~ 281 m).

Adicionalmente, en la etapa de limpieza de la tubería, se extrajo el lodo colocado dentro de la misma con la finalidad de lograr un equilibrio de presiones a medida que se introducía en el hoyo perforado.



De lo expuesto en los dos párrafos anteriores, en cuanto a la situación del pozo P-6, donde se realizaron los procedimientos y se emplearon los materiales indicados en las especificaciones suministradas por FUNVISIS, se concluye que la afectación de la sección del pozo a los 281 m es debido a la presencia de acuíferos de flujo grande y continuo, influenciado por las condiciones geológicas, geotécnicas e hídricas de la zona.

El realizar un pozo similar al ejecutado (P-6), en los alrededores del mismo, muy probablemente se correría un alto riesgo de encontrar la misma situación, tanto en la parte de construcción del pozo como en la parte de medición (estando el acelerómetro instalado).

Se debe inicialmente evaluar la posibilidad de realizar estudios geofísicos adicionales, que permitan definir las características del ambiente hidrogeológico de la zona, tales como, establecimiento de cuencas, drenajes y zonas de recarga y la identificación y mapeo de acuíferos o una testificación – diagráfia de pozo.

Adicionalmente, se debe evaluar la posibilidad de realizar algunos cambios en las especificaciones para la ejecución del pozo, dependiendo de los requisitos que amerite el buen funcionamiento del acelerómetro a instalar, tal como la utilización tubería metálica a todo lo largo del pozo.

Una situación similar se presentó en el pozo realizado en el patio posterior del edificio principal de INPARQUES, donde por problemas geológicos, geotécnicos e hídricos, se decidió cambiar el punto de exploración y perforar el pozo hasta la roca en un nuevo punto ubicado a una distancia prudencial del que en definitiva se abandonó.

Para el posible aprovechamiento del pozo P-6, se realizaron una serie de análisis, quedando tentativamente lo siguiente:

.- Se puede evaluar la factibilidad de colocarle un tapón de grava gruesa combinado con grava media, que trate de mitigar la presión de agua presente a los 281m, hasta una altura por dentro del tubo PVC a definir (~275 m), para luego tratar de utilizar un material sellante, aunado a la inyección de la lechada de cemento, esto permite trasladar la respuesta

.- Se puede evaluar la factibilidad de colocarle un tapón de cemento-bentonita solo o combinado con grava gruesa a media, que trate de mitigar la presión de agua presente a los 281 m, hasta una altura por dentro del tubo PVC a definir, para luego tratar de reperforar por dentro de la tubería de PVC, empleando maquinaria y/o equipo utilizado para perforación geotécnica, obteniéndose núcleos de cemento-bentonita de 3” de diámetro en tramos de 3 m, garantizándose que la máquina permita un torque tal que asegure el muestreo hasta los 295 m.

De poder realizar esta opción, permitiría la instalación de acelerómetros de menos de 2,5” y se correría el riesgo de someter en la sección afectada, a un posible espesor de paredes (0,5”) de una mezcla principalmente de cemento-bentonita, a la actuación del acuífero detectado. Esto aunado a la dificultad de garantizar la verticalidad de la perforación desde la cota de relleno (por arriba de los 281 m) hasta aproximadamente los 295 m.