

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO



CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE UNA SECUENCIA MIOCENA EN UNA REGIÓN DE LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO MEDIANTE LOS RESULTADOS GEOQUÍMICOS DE LA HERRAMIENTA DE ESPECTROSCOPIA ELEMENTAL

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Gutierrez P, Yerli N
Para obtener el título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre del 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE UNA SECUENCIA MIOCENA EN UNA REGIÓN DE LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO MEDIANTE LOS RESULTADOS GEOQUÍMICOS DE LA HERRAMIENTA DE ESPECTROSCOPIA ELEMENTAL

TUTOR ACADEMICO: Prof. González Lenin
TUTORES INDUSTRIALES: Ing. Díaz Enrique

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Gutierrez P, Yerli N
Para obtener el título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre del 2008

Caracas, Noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Yerli Nohelia Gutiérrez Puerta, titulado:

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE UNA SECUENCIA MIOCENA EN
UNA REGIÓN DE LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO
MEDIANTE LOS RESULTADOS GEOQUÍMICOS DE LA
HERRAMIENTA DE ESPECTROSCOPIA ELEMENTAL**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Profesora Evelyn Azuaje
Jurado

Profesor Ricardo Alezones
Jurado

Profesor Lenin González
Jurado

GUTIÉRREZ P, YERLI N.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE UNA SECUENCIA MIOCENA EN UNA REGIÓN DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO MEDIANTE LOS RESULTADOS GEOQUÍMICOS DE LA HERRAMIENTA DE ESPECTROCOPIA ELEMENTAL

Tutor académico: Prof. Gonzáles, Lenín. Tutor Industrial: Ing. Díaz, Enrique. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2008, 198 pag.

Palabras clave: Formación Oficina, perfil de espectroscopía elemental, fluorescencia de rayos X, caracterización química, estadística univariante y multivariante.

Resumen:

En este trabajo se caracterizó químicamente la sección basal de la Formación Oficina en cuatro pozos situados al sur de Junín en la Faja Petrolífera del Orinoco, aplicando la tecnología de registros basada en espectroscopía elemental. La secuencia estudiada se compone litológicamente de areniscas, lutitas y heterolitas depositadas en ambientes deltaicos con influencia mareal.

Se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (FRX-DE) a 81 muestras tomadas de forma equidistante (cada 4 pies) en un intervalo de 323 pies en total en el pozo A con la finalidad de comparar y validar las mediciones químicas estimadas por el perfil de espectroscopía elemental. La comparación entre las curvas de frecuencia acumulada para cada elemento permitió comprobar la validez de las mediciones geoquímicas obtenidas por la herramienta.

Utilizando las proporciones en peso de los elementos Al, Si, Fe, Mg, Mn, S, U, Th, K, Gd y Ca medidos por esta tecnología de registros, se elaboraron perfiles verticales de concentración para cada elemento y adicionalmente, se procesaron los resultados químicos con técnicas estadísticas univariantes (histogramas y diagramas de caja) y multivariantes (diagramas de agrupaciones y funciones discriminantes) para definir unidades y subunidades químicas dentro de la secuencia estudiada en los cuatro pozos. Los resultados permitieron reconocer cuatros

unidades químicas mayores en cada uno de los pozos; y la evaluación de la continuidad lateral de las unidades químicas mayores permitió reconocer la existencia de tres unidades de extensión regional dentro del área estudiada que se denominaron como U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1), U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2) y U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3). Finalmente, según la composición química de las muestras estudiadas en los cuatro pozos, las principales litologías encontradas fueron: lutitas, grauvacas, litarenitas y sublitarenitas utilizando la clasificación geoquímica de HERRON (1988), mientras que las petrografías pertenecientes al pozo A mostraron solo tres tipos de litologías cuarzoarenitas, arcosas y litarenitas según PETTIJOHN (1987).

Con este trabajo, además de caracterizar químicamente unos 400 pies aproximadamente de la sección basal de la Formación Oficina en el área sur de Junín y aportar nueva información geológica para el conocimiento de la Faja Petrolífera del Orinoco donde anteriormente no existía ningún tipo de datos de geoquímica orgánica, permitió comprobar la utilidad de los perfiles de espectroscopía elemental para realizar caracterizaciones químicas y correlaciones quimioestratigráficas; representando un estudio pionero que abre los horizontes de la industria del perfilaje de pozos hacia la realización de estudios quimioestratigráficos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
LISTA DE ANEXOS	xx
1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivo y Alcances.....	2
1.2.1. Objetivos General.....	2
1.2.2. Objetivos Específico.....	2
1.2.3. Alcances del trabajo.....	3
1.2.4. Planteamiento del trabajo.....	3
1.3. Ubicación del área de estudio.....	4
1.4. Antecedentes.....	5
2. CAPÍTULO II METODOLOGÍA	10
2.1. Generalidades.....	10
2.2. FASE 1: <i>Recopilación de información</i>	11
2.3. FASE 2: <i>Trabajo con las muestras en el laboratorio</i>	11
2.4. FASE 3: <i>Validación de la herramienta de espectroscopía elemental</i>	15
2.5. FASE 4: <i>Procesamiento Geoestadístico de los datos e interpretación geológica</i>	16
2.6. FASE 5: <i>Procesamiento e interpretación de datos de pozos vecinos</i>	16
2.7. FASE 6: <i>Determinación de alcances del Herramientas de Espectroscopía Elemental</i>	17

3. CAPÍTULO III GEOLOGÍA REGIONAL	18
3.1. Generalidades.....	18
3.1.2. Evolución Geodinámica de la Región.....	19
3.2. Estratigrafía regional de la Faja Petrolífera del Orinoco.....	21
3.2.1. Oligoceno (Ciclo I).....	23
3.2.1.1. Formación La Pascua.....	24
3.2.1.2. Formación Roblecito.....	25
3.2.1.3. Formación Chaguaramas.....	25
3.2.2. Mioceno (Ciclo 2 y 3).....	26
3.2.2.1. Unidad I.....	26
3.2.2.2. Unidad II.....	27
3.2.2.3. Unidad III.....	28
3.2.2.4. Formación Oficina.....	29
3.2.2.5. Unidad IV.....	31
3.2.2.6. Unidad V.....	31
3.2.3. Depósitos Post – Mioceno (Formación Las Piedras).....	32
3.3. Tectónica de la Faja Petrolífera del Orinoco.....	32
3.4. Estratigrafía regional del área de Junín.....	34
3.4.1. Paleozoico.....	34
3.4.1.1. Formación Hato Viejo.....	34
3.4.1.2. Formación Carrizal.....	35
3.4.2. Mesozoico.....	35
3.4.2.1. Formación Ipire (Capas Rojas).....	35
3.4.2.2. Basalto de Altamira.....	35
3.4.2.1. Grupo Temblador.....	36
3.4.3. Cenozoico.....	37
3.4.3.1. Formación Roblecito.....	37
3.4.3.2. Formación Oficina.....	37
3.4.3.3. Formación Freitas.....	37
3.4.3.4. Formación Mesa.....	38

4. CAPÍTULO IV MARCO TEÓRICO	39
4.1. Generalidades.....	39
4.2. Fluorescencia de rayos X.....	39
4.2.1. Efectos de la matriz.....	41
4.3. Geoestadística.....	41
4.3.1. Estadísticas Univariante.....	42
4.3.1.1. Medidas de tendencia central.....	42
4.3.1.2. Medidas de variabilidad.....	43
4.3.2. Estadísticas Multivariantes.....	44
4.3.2.1. Componentes principales.....	44
4.3.2.2. Funciones discriminantes.....	44
4.3.2.3. Análisis de agrupación.....	46
4.3.3. Métodos Estadísticos Gráficos.....	46
4.3.3.1. Diagrama de Barras.....	46
4.3.3.2. Tipos de curvas de frecuencia.....	47
4.3.3.3. Perfiles de distribución.....	48
4.4. Quimioestratigrafía.....	49
4.5. Tecnología de registro basada en Espectroscopia Elemental.....	50
4.5.1. Principios y funcionamiento del perfil de espectroscopía elemental.....	49
4.5.2. Espectroscopía nuclear de rayos gamma.....	55
4.5.2.1. Proporciones elementales.....	55
4.5.2.2. Concentraciones de la formación.....	60
4.5.2.3. Litología y Mineralogía.....	63
5. CAPÍTULO V RESULTADOS	67
5.1. Generalidades.....	67
5.2. Validación de las mediciones químicas realizadas por la herramienta de espectroscopía elemental.....	67
5.3. Clasificación geoquímica según HERRON (1988).....	74
5.4. Descripción litológica general de cada pozo.....	77
5.4.1. Litología general del pozo A.....	77

5.4.2. Análisis petrográficos del pozo A.....	79
5.4.3. Litología general del pozo B.....	80
5.4.4. Litología general del pozo C.....	82
5.4.5. Litología general del pozo D.....	84
5.6. Definición de la Formación Oficina en el área de estudio.....	89
5.5. Definición de unidades químicas.....	90
5.5.1. Unidades del Pozo A.....	91
5.5.1.1. Unidad mayor A-1.....	91
5.5.1.2. Unidad mayor A-2.....	94
5.5.1.3. Unidad mayor A-3.....	98
5.5.1.4. Unidad mayor A-4.....	102
5.5.2. Unidades del Pozo B.....	104
5.5.2.1. Unidad mayor B-1.....	104
5.5.2.2. Unidad mayor B-2.....	108
5.5.2.3. Unidad mayor B-3.....	110
5.5.2.4. Unidad mayor B-4.....	113
5.5.3. Unidades del Pozo C.....	115
5.5.3.1. Unidad mayor C-1.....	115
5.5.3.2. Unidad mayor C-2.....	119
5.5.3.3. Unidad mayor C-3.....	121
5.5.3.4. Unidad mayor C-4.....	123
5.5.4. Unidades del Pozo D.....	125
5.5.4.1. Unidad mayor D-1.....	125
5.5.4.2. Unidad mayor D-2.....	129
5.5.4.3. Unidad mayor D-3.....	130
5.5.4.4. Unidad mayor D-4.....	134
5.6. Análisis Estadísticas Univariante.....	136
5.6.1. Histogramas de frecuencia químicos.....	136
5.7. Diagrama de caja para todos los pozos.....	150
5.7.1. Descripción entre los pozos para cada elemento y por unidad definida.....	150
5.8. Análisis Estadísticas Multivariante.....	158

5.8.1 Análisis de agrupaciones.....	158
5.8.1.1. Análisis de agrupaciones para el pozo A.....	158
5.8.1.2. Análisis de agrupaciones para el pozo B.....	160
5.8.1.3. Análisis de agrupaciones para el pozo C.....	160
5.8.1.4. Análisis de agrupaciones para el pozo D.....	160
5.9. Funciones discriminantes.....	165
5.9.1. Separación de las unidades mayores químicas para cada pozo estudiado....	165
5.9.1.1. Pozo A.....	165
5.9.1.2. Pozo B.....	168
5.9.1.3. Pozo C.....	170
5.9.1.4. Pozo D.....	172
5.10. Correlación de las unidades químicas entre los pozos estudiados.....	175
5.10.1. Unidad química mayor U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1).....	175
5.10.2. Unidad química mayor U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2).....	177
5.10.3. Unidad química mayor U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3).....	179
5.10.4. Unidad química mayor U-4 (A-4, B-4, C-4 y D-4).....	180
5.11. Definición de unidades químicas mayores.....	184
5.12. Alcances y limitaciones del perfil de espectroscopía elemental.....	185
5.12.1. Alcances.....	187
5.12.2. Limitaciones.....	188
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	 190
 BIBLIOGRAFÍA.....	 195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Ubicación de la F:P.O y la zona de estudio (Figura superior: tomado de KEYHOLE & GOOGLE., 2008, figura inferior: BEJARANO 2006)	4
Figura 2.1	Toma de muestra a partir del núcleo.....	12
Figura 2.2	Descripción visual utilizado lupa de 10X.....	12
Figura 2.3	Preparación de la muestra para ser analizada por FRX.....	13
Figura 2.4	Equipo de fluorescencia de rayos X.....	14
Figura 2.4	Petrográficas izquierda nicols paralelos y derecha nicols cruzados.....	15
Figura 3.1	Perfil de la Cuenca oriental de Venezuela (tomada de YORIS <i>et al.</i> 1987).....	18
Figura 3.2	Desarrollo del borde sur del Caribe Durante el Eoceno Medio al Presente.Tomado de DI CROCE et al. (1999).....	21
Figura 3.3	Edad de los ciclos transgresivos de terciarios reconocidos en la F.P.O. sección este-oeste (Modificado de AUDEMARD, 1985).....	22
Figura 3.4	Estratigrafía Regional de la F.P.O. tomado de BEJARANO 2006.....	27
Figura 3.5	Paleoambientes de la F.P.O (AUDEMARD 1985).....	30
Figura 3.6	Configuración esquemática F.P.O (AUDEMARD 1985).....	33
Figura 3.7	Columna estratigráfica del área de Junín (Tomado de DUGARTE 2008).....	38
Figura 4.1	Generación de Rayos Gamma (Tomado y modificado de http://www.nitonuk.co.uk/).....	39
Figura 4.2	Ejemplo de cuantificación de elementos mayoritarios a partir de FRX (Tomado y modificado de http://www.nitonuk.co.uk/).....	40
Figura 4.3	Representación de dos distribuciones bivariantes mostrando el solape entre los grupos A y B en conjuntos con ambas variables X_1 y Y_2 (Tomado de DAVIS 1973).....	45
Figura 4.4	Dendrograma (tomado de DAVIS 1973).....	46
Figura 4.5	Histograma y polígono de frecuencia (Tomado de BAVUTTI 2006)...	47
Figura 4.6	Ejemplo de un perfil químico de distribución en el que es posible apreciar la variación de concentración de SiO_2 a lo largo de la sección.(Tomado de BAVUTTI 2006).....	48

Figura 4.7	Grafico de clasificación geoquímica de HERRON (1988).....	50
Figura 4.8	Detalle esquemático de la herramienta (Modificado de PEMPER et al 2006).....	51
Figura 4.9	Esquema de interacción de los neutrones en la formación (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	52
Figura 4.10	Distribución de los espectros energéticos captados por la herramienta en función del tiempo (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	53
Figura 4.11	Calibración del espectro energético según el número de canales.....	54
Figura 4.12	Espectro de captura para 5 litologías básicas.....	57
Figura 4.13	Espectro inelástico para 5 litologías básicas (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	57
Figura 4.14	Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro natural. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	58
Figura 4.15	Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro de captura. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	58
Figura 4.16	Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro inelástico. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	58
Figura 4.17	Relación lineal entre la ganancia elemental y la fracción en peso del elemento Silicio.(Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	62
Figura 4.18	Diagrama ternario para clasificación de litologías generales. (Modificado de PEMPER et. al. 2006).....	64
Figura 4.19	Fotografía de la sección petrográfica de la arenisca feldespática evaluada. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	65
Figura 4.20	Ejemplo del registro de espectroscopía elemental en un pozo de Suramérica. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	66
Figura 5.1	Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para el elemento Si.....	68
Figura 5.2	Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos K y Ca.....	69
Figura 5.3	Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos Al y Fe.....	70
Figura 5.4	Representación esquemática de la relación entre los valores obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PPE) y los obtenidos por FRX para el elemento Al y K. El grafico se muestra la línea roja que representa la tendencia ideal que deben poseer los valores y la línea azul representa la tendencia que poseen.....	71

Figura 5.5	Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos Si y Fe. Las flechas negras muestran quiebres de importancia observados en ambas curvas.....	72
Figura 5.6	Representación esquemática de la relación entre los valores obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PPE) y los obtenidos por FRX para el elemento Si. El grafico se muestra la línea roja que representa la tendencia ideal que deben poseer los valores y la línea azul representa la tendencia que poseen.....	73
Figura 5.7	Ubicación de las muestras del pozo A en el esquema de clasificación de HERRON (1988).....	74
Figura 5.8	Ubicación de las muestras del pozo B en el esquema de clasificación de HERRON (1988).....	75
Figura 5.9	Ubicación de las muestras del pozo C en el esquema de clasificación de HERRON (1988).....	75
Figura 5.10	Ubicación de las muestras del pozo C en el esquema de clasificación de HERRON (1988).....	76
Figura 5.11	Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo A.....	78
Figura 5.12	En las fotos se muestran una vista bajo en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1610' clasificada según PETTJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto con nicoles paralelos (derecha) se puede apreciar como existe una gran proporción de color azul el cual corresponde al teñido realizado para diferenciar la porosidad de la roca, donde éste se asocia a porosidad inducida por el proceso de eliminación del hidrocarburo.....	79
Figura 5.13	En las fotos se muestran una vista bajo en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 2349' clasificada según PETTJOHN (1987) como una cuarzoarenita. Donde se puede apreciar el alto contenido de porosidad inducida (color azul) y el la subangular de los clastos en su mayoría de cuarzo.....	80
Figura 5.14	En las fotos se muestran una vista bajo en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1692' clasificada según PETTJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto de la izquierda podemos ver como existe la presencia de cemento de calcita señalado en los círculos rojos.....	80

Figura 5.15	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 2398' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto se puede apreciar como la matriz que se logro conservar es mayormente caolinita.....	80
Figura 5.16	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1750' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una areniscas subfeldespática. En la foto se puede apreciar un cristal de Feldespato potasico (microclino) que se muestra alterado.	81
Figura 5.17	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1646' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una areniscas subfeldespática. En la foto se puede apreciar un cristal de Feldespato potasico (microclino) que se muestra alterado.	81
Figura 5.18	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. En la foto se puede apreciar el tamaño de los clastos que son de poco tamaño por debajo de los 0.1 milímetros y posee alta porosidad.....	81
Figura 5.19	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. Se puede apreciar los fragmentos de roca.....	82
Figura 5.20	En las fotos se muestran una vista bajo en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. Se puede apreciar los fragmentos de roca ígnea.....	82
Figura 5.21	Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo B.....	84
Figura 5.22	Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo C.....	86
Figura 5.23	Columna estratigráfica correspondiente al pozo D.....	88
Figura 5.24	Perfiles verticales del pozo A donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies.....	95
Figura 5.25	Perfil de frecuencia acumulada de los datos del perfil de espectroscopía elemental que muestra el cambio de pendiente entre las unidades A-1 y A-2 en siete elementos estudiados.....	97
Figura 5.26	Perfil de frecuencia acumulada que muestra el cambio de pendiente entre las unidades A-2 y A-3 ₁ en siete elementos estudiados.....	99
Figura 5.27	Perfiles verticales del pozo B donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies.....	105

Figura 5.28	Perfiles verticales del pozo C donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies.....	117
Figura 5.29	Perfiles verticales del pozo D donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies.....	126
Figura 5.30	Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo A.....	136
Figura 5.31	Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo B.....	140
Figura 5.32	Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo C.....	143
Figura 5.33	Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo D.....	146
Figura 5.34	Comparación del elemento Si entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.....	151
Figura 5.35	Comparación del elemento Fe entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.....	152
Figura 5.36	Comparación del elemento Th entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.....	153
Figura 5.37	Comparación del elemento Ti entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.....	154
Figura 5.38	Comparación del elemento U entre los cuatro pozos evaluados, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.	155
Figura 5.39	Comparación del elemento Al entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.	156
Figura 5.40	Comparación del elemento K entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.....	157
Figura 5.41	Dendrograma para el pozo A.....	159
Figura 5.42	Dendrograma para el pozo B.....	161
Figura 5.43	Dendrograma para el pozo C.....	163
Figura 5.44	Dendrograma para el pozo D.....	164
Figura 5.45	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo A.....	165
Figura 5.46	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades A-3 _I y A-3 _{II}	167

Figura 5.47	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad A-3 (A-3 _L - Lutitas y A-3 _A - Areniscas).....	167
Figura 5.48	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo B.....	168
Figura 5.49	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades B-3 _I y B-3 _{II}	169
Figura 5.50	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad B-3 (B-3 _L – lutitas y B-3 _A - Areniscas).....	169
Figura 5.51	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo C.....	170
Figura 5.52	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo D.....	172
Figura 5.53	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades D-3 _I y D-3 _{II}	173
Figura 5.54	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad D-3 (D-3 _L – Lutitas y D-3 _A - Areniscas).....	174
Figura 5.55	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-1, B-1, C-1 y D-1.....	176
Figura 5.56	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-2, B-2, C-2 y D-2.....	178
Figura 5.57	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-3, B-3, C-3 y D-3.	179
Figura 5.58	Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-4, B-4, C-4 y D-4.....	181
Figura 5.59	El grafico muestra como la unidad A-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo C, comportamientos similares presenta para los pozos B y D.	182
Figura 5.60	El grafico muestra como la unidad B-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo A, comportamientos similares presenta para los pozos C y D.	182
Figura 5.61	El grafico muestra como la unidad C-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo D, comportamientos similares presenta para los pozos A y D.	183

Figura 5.62	El grafico muestra como la unidad D-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo B, comportamientos similares presenta para los pozos A y D.	183
Figura 5.63	El grafico se muestra la separación existe entre las tres unidades químicas mayores U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1), U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2) y U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3) que se definieron como correlacionables entre si.	184
Figura 5.64	El grafico se muestra la separación existe entre las cuatro unidades químicas mayores U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1), U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2), U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3) y U-4 (A-4 B-4, C-4 y D-4).....	185
Figura 5.65	El grafico muestra los perfiles verticales generados para los cuatro pozos estudiados a partir de las funciones discriminantes generadas para cada unidad definidas.....	187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Elementos químicos que son determinados por cada tipo de espectro. (Modificado de PEMPER et. al. 2006).....	56
Tabla 4.2	Comparación de los valores obtenidos por la herramienta y análisis de núcleos en diferentes tipos de formaciones. (Tomado de PEMPER et. al. 2006).....	61
Tabla 4.3	Comparación de los valores obtenidos por la herramienta y los análisis de núcleos en diferentes tipos de formaciones. (Modificado de PEMPER et. al. 2006).....	63
Tabla 5.1	Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo A.....	92
Tabla 5.2	Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo A.....	93
Tabla 5.3	Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo B.....	106
Tabla 5.4	Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo B.....	107
Tabla 5.5	Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo C.....	118
Tabla 5.6	Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo C.....	119
Tabla 5.7	Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo D.....	127
Tabla 5.8	Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo D.....	128
Tabla 5.9	Análisis de los Histograma del Pozo A.....	139
Tabla 5.10	Análisis de los Histograma del Pozo B.....	142
Tabla 5.11	Análisis de los Histograma del Pozo C.....	145
Tabla 5.12	Análisis de los Histograma del Pozo D.....	148
Tabla 5.13	Clasificación de las muestras del pozo A por cada unidad.....	166
Tabla 5.14	Clasificación de las muestras del pozo B por cada unidad.....	170
Tabla 5.15	Clasificación de las muestras del pozo C por cada unidad.....	171

Tabla 5.16	Clasificación de las muestras del pozo D por cada unidad.....	172
Tabla 5.17	Clasificación de las muestras para la unidad U-1.....	176
Tabla 5.18	Clasificación de las muestras para la unidad U-2.....	178
Tabla 5.19	Clasificación de las muestras para la unidad U-3.....	180
Tabla 5.20	Clasificación de las muestras para la unidad U-4.....	181
Tabla 5.21	Clasificación de las tres unidades químicas mayores definida en el área.....	185
Tabla 5.22	Clasificación de las tres unidades químicas mayores definida en el área conjuntamente con la posible unidad U-4.....	186

LISTA DE ANEXOS

Anexo N° 1	Tabla de resultados de Fluorescencia de rayos X
Anexo N° 2	Perfiles de frecuencia acumulada comparativos entre los datos de fluorescencia de rayos X y las mediciones del perfil de espectroscopia elemental
Anexo N° 3	Tabla de datos químicos correspondientes al pozo A
Anexo N° 4	Tabla de datos químicos correspondientes al pozo B
Anexo N° 5	Tabla de datos químicos correspondientes al pozo C
Anexo N° 6	Tabla de datos químicos correspondientes al pozo D
Anexo N° 7	Resumen de análisis petrográfico del pozo A
Anexo N° 8	Perfiles verticales de los elementos químicos para el pozo A
Anexo N° 9	Perfiles verticales de los elementos químicos para el pozo B
Anexo N° 10	Perfiles verticales de los elementos químicos para el pozo C
Anexo N° 11	Perfiles verticales de los elementos químicos para el pozo D
Anexo N° 12	Perfiles verticales de Relaciones de elementos para el pozo A
Anexo N° 13	Perfiles verticales de Relaciones de elementos para el pozo B
Anexo N° 14	Perfiles verticales de Relaciones de elementos para el pozo C
Anexo N° 15	Perfiles verticales de Relaciones de elementos para el pozo D
Anexo N° 16	Perfiles de frecuencia acumulada de los elementos químicos para el pozo A
Anexo N° 17	Perfiles de frecuencia acumulada de los elementos químicos para el pozo B
Anexo N° 18	Perfiles de frecuencia acumulada de los elementos químicos para el pozo C
Anexo N° 19	Perfiles de frecuencia acumulada de los elementos químicos para el pozo D
Anexo N° 20	Representación esquemática de la posible correlación entre los cuatro pozos estudiado

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades:

La Faja Petrolífera del Orinoco (F.P.O.) es parte de la cuenca sedimentaria oriental de Venezuela constituida por una cuña sedimentaria Oligo – Miocena depositada en ambientes sedimentarios deltaicos. Esta cuenca posee una extensión en sentido este-oeste de aproximadamente 600 km y en sentido norte – sur es 70 km. La F.P.O. por razones administrativos y operativos se encuentra dividida en cuatro bloques de extensiones menores: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, de oeste a este.

En el proceso de exploración para el conocimiento de la F.P.O. se utilizan los últimos avances tecnológicos que se encuentran en el mercado, entre ellos se encuentran las herramientas de perfilaje de pozo que determinan el porcentaje en peso de elementos químicos que se encuentran en una formación, llamadas Registros de Espectroscopia Elemental. En estos momentos para este tipo de herramientas de espectroscopia elemental no se ha evaluado el potencial que ofrece para la caracterización química de formaciones a partir de los datos que se obtienen con la misma.

Las caracterizaciones químicas de las formaciones son de gran utilidad para el conocimiento de las condiciones de depositación de las rocas como salinidad, Eh, pH y paleoclimas. Además que éstas implican una huella química que puede ser correlacionable con pozos y zonas adyacentes. La caracterización química permite el establecimiento de unidades quimioestratigraficas que pueden ser identificadas y correlacionadas independientemente de las unidades litoestratigraficas.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1.- Objetivo General:

- Realizar la caracterización química de una secuencia miocena ubicada en una región de La Faja Petrolífera del Orinoco mediante los resultados geoquímicos obtenidos a través de una herramienta de espectroscopia elemental, en el campo Junín, estado Guárico.

1.2.2.-Objetivos Específicos:

- Recopilar información bibliográfica (tesis, publicaciones, trabajos internos, etc).
- Realizar análisis de Fluorescencia de rayos X (FRX) de aproximadamente 80 muestras pertenecientes a un pozo ubicado en el área de estudio.
- Validar de la herramienta de espectroscopia elemental integrando los resultados de FRX de las muestras analizadas.
- Identificar y caracterizar las unidades químicas de la secuencia miocena a partir de la herramienta de espectroscopía elemental en cuatro pozos cercanos.
- Procesar mediante estadística univariante y multivariante los datos generados por el perfil, utilizando análisis de agrupaciones y análisis de funciones discriminantes.
- Establecer similitudes entre los grupos de estratos de cada pozo a partir de las relaciones verticales y laterales evaluadas por la herramienta de espectroscopía elemental.
- Interpretar geológicamente los resultados obtenidos de la caracterización química de los cuatro pozos evaluados.

1.2.3.- Alcances del Trabajo

- Determinación de las unidades químicas reconocibles en el área de estudio.
- Suministrar datos que permitan optimizar los resultados de los registros de identificación mineralógica.
- Establecer alcances del Registro de Espectroscopia Elemental

1.2.4.- Planteamiento del Problema:

En la industria petrolera es de gran importancia la adquisición del mayor número de información posible de las cuencas que se deseen explorar, lo cual permite entender e inferir los procesos geológicos involucrados en su formación. Es precisamente por esta razón que al evaluar una cuenca donde la información se encuentra limitada en el subsuelo uno de los procesos exploración más viable y económico para la obtención de la misma es a través de registros de perfilajes de pozos.

En el mercado existe un gran número de registros de perfilaje de pozo presentes en la actualidad, entre ellos se encuentra la herramienta de espectroscopia elemental. Es por esta razón que se busca con este trabajo evaluar el potencial que posee la herramienta de espectroscopia elemental como fuente de información necesaria para delimitar y correlacionar unidades químicas.

La determinación de formaciones quimioestratigráficas es de gran utilidad para establecer correlaciones dentro de una cuenca, ya que esta no se limita a características litológicas de las rocas si no, que depende de las condiciones ambientales y depositacionales de la misma. Lo cual hace que al combinar estas unidades químicas con otros resultados geológicos permitan adquirir un conocimiento mayor de la cuenca.

1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Trabajo Especial de Grado se limitará a una subdivisión del bloque Junín en las coordenadas latitud norte 8°00' - 8°30' y longitud este 65°00' - 65°30' ubicado en su parte más sur perteneciente al proyecto Magna Reserva, que se encuentra en el estado Guárico, en un área de aproximadamente 46km² (Figura 1.1).

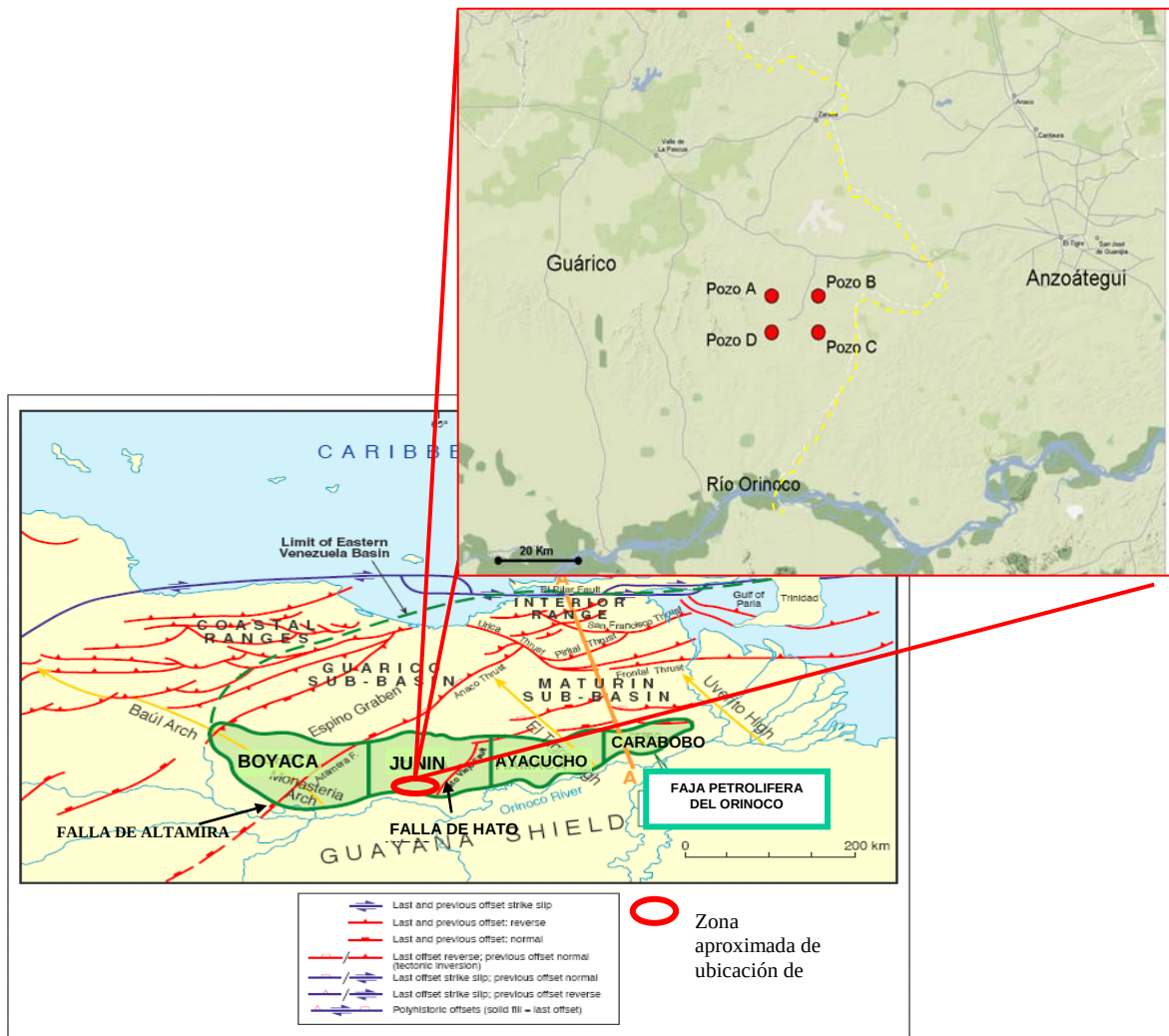


Figura 1.1 Ubicación de la F:P.O y la zona de estudio (Figura superior tomado de KEYHOLE & GOOGLE., 2008, figura inferior: BEJARANO 2006). Nótese la ubicación de los pozos estudiados.

1.4 ANTECEDENTES

A continuación se citan las referencias bibliográficas que se utilizaron en el Trabajo Especial de Grado:

1.4.1. Trabajos en la Formaciones Oficina

LEÓN & VIELMA (2006), En este trabajo completaron un modelo estratigráfico-estructural del campo Socororo Este, estado Anzoátegui, Cuenca Oriental de Venezuela. Para ello se correlacionaron las arenas del intervalo en 25 pozos del campo evaluándose las curvas de Potencial Espontáneo (SP), Rayos Gamma (GR) y Resistividad (R). Determinaron que en el campo predomina una estructura tipo monoclinas de rumbo casi noroeste-sureste, pero muy cercano al este oeste, y buzamiento de tres (3) grados al norte; cortados por los dos sistemas de fallas, que evidencia una geometría de bloques limitados por fallas normales.

PÉREZ (2006), Este trabajo define una caracterización geológica del Miembro Morichal (arenas G, F, E, D, C, B2, B1 y A) de la Formación Oficina, en el Campo Jobo que se encuentra en el estado Monagas. Las unidades estudiadas se hallan en un marco estructural donde se desarrollan anticlinales y sinclinales apretados con un buzamiento hacia el norte, donde las fallas principales siguen un rumbo regional este-oeste y con buzamientos en dirección sur. Las unidades se desarrollan en un ambiente fluvial hacia la base, con dominio de canales entrelazados y zonas de canales amalgamados; hacia el tope predomina un ambiente estuarino de dominio mareal, ubicando la secuencia en su parte externa.

1.4.2. Trabajos en Quimioestratigrafía

GONZÁLEZ & SÁNCHEZ (2001), Realizaron la caracterización radiométrica y química de dos secciones estratigráficas pertenecientes a la Formación La Luna en el occidente de Venezuela. Lograron la correlación de las secciones estratigráficas a través de estadísticas multivariantes, determinando que ambas presentan características químicas y radiométricas similares, por lo cual las condiciones sedimentarias también lo fueron.

CHACÍN (2003), Caracterizó química y radiométricamente muestras de canal correspondiente a cuatro pozos del campo petrolífero La Concepción para definir tres unidades químico – radiométricas mayores para los pozos denominados A, B y D y dos para el pozo C, estableciéndose continuidad entre ellas, para definir la unidades mayores inferior ($1-A + 1-B + 1-D$), que no presenta continuidad lateral entre los pozos; una unidad intermedia ($2-A + 2-B + 2-C + 2-D$) que presenta continuidad entre los pozos B y C principalmente y una unidad superior ($3-A + 3-B + 3-C + 3-D$) que es continua entre todos los pozos.

CEDILLO & OLAYA (2003), Caracterizaron química y radiométricamente los sedimentos depositados durante el Cuaternario en la Plataforma Deltana venezolana, provenientes de 4 núcleos tipo “piston core” PD-01G P29, S4, C38 y Q3, con el fin de correlacionar los cambios de las variables analizadas con diversos procesos geológicos, así como compararon y establecieron las relaciones verticales y laterales entre ellos. Definió 2 unidades químico-radiométrica mayores para cada uno de los núcleos; además, fueron determinadas 4 asociaciones químicas (siliciclástica, arcillosa, orgánica y carbonática), que caracterizan a dichas unidades.

RIVERO & LEAL (2004), Mediante los métodos de FRX y determinación de carbono total por combustión caracterizaron químicamente la sección superior de la Formación El Paraíso en el estado Falcón. Definieron dos unidades químicas y cinco grupos químicos en la secuencia estratigráfica. El ambiente de depositación asociado lo define como lagunar para la parte basal, de marisma alta para la parte media y de marisma baja para la parte superior de la formación.

ALTUNA (2006), realizó la caracterización química y radiométrica de diversos niveles de los pozos MAC-1X, MAC-2X y PIC-25 en el estado Monagas, flanco sur de la Serranía del Interior Oriental, cuenca oriental de Venezuela. Además, determino la procedencia de dichos sedimentos, quedando clasificados mayoritariamente en dos ambientes tectónicos: margen continental pasivo (MCP), para las formaciones Macal y Barranquín y margen continental activo (MCA) principalmente para la Formación Naricual (pozo PIC-25).

ARIZA (2006), Realizó la caracterización quimioestratigráfica del límite Eoceno - Oligoceno en el área surcentral de la cuenca de Falcón mediante la definición de unidades químicas. Mediante la comparación de las unidades químicas establecidas para cada sección, se determinó que las formaciones El Paraíso y Castillo – Churuguara sin diferenciar, no presentan afinidad química. Los ambientes tectónicos que corresponden a las formaciones Eocena se encuentra asociada a arcos de islas continentales mientras que la unidad El Paraíso de edad Oligoceno se asocia a un margen continental pasivo. Las formaciones Castillo – Churuguara sin diferenciar, se asocian igualmente a un arco de isla continental.

BAVUTTI (2006), Realizó una caracterización química de una sección de la Formación Aguardiente, en el estado Táchira, definió 3 unidades químicas mayores y 7 subunidades, a partir de variaciones químicas observadas en perfiles de concentración y corroboradas con estadística multivariante. En base a las características geoquímicas y sedimentológicas de las muestras, se propone un ambiente depositacional costero a transicional.

VIEIRA (2006), Realiza un análisis quimioestratigráfico en muestras de canal a intervalos de cincuenta pies para dos pozos en el área TACAT durante el Mioceno Temprano-Medio a través de la técnica EEA-ICP. Los resultados que se obtuvieron señalaron que concentraciones químicas se encuentran supeditadas a ambientes depositacionales y no así para sistemas encadenados. Las respuestas químicas en las muestras de canal permiten establecer una tendencia general que refleja la sucesión de ambientes depositacionales; son especialmente marcados los cambios repentinos en la columna de agua reportados durante las superficies de máxima inundación y límites de secuencia.

MONTERO *et al.* (2007), Realizan un estudio para la aplicación de métodos de estadística multivariada en datos quimioestratigráficos para identificar y correlacionar quimiofacies. Determinaron asociaciones geoquímicas: (a) redox-materia orgánica y (b) clástica. La asociación redox-materia orgánica se hace más prominente hacia el tope de la formación. Concluyen que el análisis de agrupamiento y correspondencia son herramientas estadísticas

mucho más robustas que el análisis factorial, en el estudio geoquímico de secciones estratigráficas.

1.4.3. Publicaciones

AUDEMARD *et al.* (1985), Presentan un modelo sedimentológico-estructural de la Faja Petrolífera del Orinoco para el Terciario; mediante correlaciones litoestratigráficas se reconocen tres ciclos de transgresión-regresión. Mencionan que las unidades arenosas tipifican deltas progradantes hacia el norte, asociados a fases regresivas, influenciados por la acción de olas y mareas.

PARNAUD *et al.* (1995), Construyen un modelo geológico integrado por primera vez mediante datos estratigráficos, estructurales, geoquímicos y de yacimiento, que le permitieron identificar sistemas petrolíferos y definir yacimientos en el cinturón de pliegues y cabalgamientos de la cuenca antepaís de Venezuela Oriental.

PEARCE (1998), Realiza una correlación de las secuencias Duckmantian/Stephanian encontradas en dos pozos de West Midlands (U.K.). Las cuales establecieron 16 unidades químicas en funciones discriminantes para la determinación de dichas unidades, así como también lograron determinar la procedencia de los sedimentos que conforman estas secuencias mediante la aplicación de geoquímica.

DI CROCE *et al.* (1999), Realizan un estudio de estratigrafía secuencial de la Cuenca Oriental de Venezuela, por medio de múltiples líneas sísmicas, donde identifican y caracterizan secuencias de segundo, tercer y mayores órdenes; caracterizan el origen de las mayores discordancias dentro de la cuenca en el subsuelo como costa afuera; para obtener una visión integrada de la estratigrafía de la cuenca.

ARIAS (2004), Realizó un estudio de minerales de arcillas presentes en muestras de sedimentos superficiales y núcleos de la fachada atlántica venezolana. Determino que la principal fuente de los sedimentos depositados en esta zona proviene del río Orinoco, mientras que la fracción

> 2 micras proviene en su mayoría de la Amazonia y es transportada por la corriente de Guayana. Establece que las variaciones porcentuales de los minerales de arcilla en sedimentos cuaternarios de la fachada atlántica venezolana, pueden ser interpretadas como cambios paleoclimáticos.

PEMPER (2006), Muestra un nuevo servicio de perfilaje de pozos abierto llamado RockViewSM, esta herramienta se basa en una fuente de neutrones pulsantes que interactúan con la formación, donde se generan espectros de energía que son interpretados y transformados en porcentaje en peso de 13 elementos (Al, C, Cl, Ca, Fe, Gd, K, Mg, Mn, S, Si, Th, Ti y U). Con los porcentajes en peso de cada elemento es transformado en litología general y mineralogía específica mediante la aplicación de triángulos ternarios. Concluyen que el análisis de agrupamiento y correspondencia son herramientas estadísticas mucho más robustas que el análisis factorial, en el estudio geoquímico de secciones estratigráficas.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Generalidades

A continuación se muestran de una forma esquematizada las distintas fases que se llevaron a cabo para realizar el trabajo especial de grado:



2.2. FASE 1: *Recopilación de información*

En esta fase del trabajo se realizó una recopilación y revisión bibliográfica existente, entre los cuales se encuentra:

- Trabajos realizados en el área de estudio.
- Trabajos de la formación en estudio (tesis y estudios sedimentarios previos).
- Trabajos y publicaciones librés de caracterizaciones geoquímicas.
- Trabajos internos relacionados con el tema a desarrollar en el Trabajo Especial de Grado.
- Estudio sedimentológico realizado al núcleo a muestrear.
- Recopilación de los registros de espectroscopía elemental.
- Así como la escogencia de los pozos vecinos, intervalo y frecuencia de muestreo.

2.3. FASE 2: *Trabajo con las muestras en el laboratorio*

2.3.1. Toma de muestra a partir del núcleo

- En esta etapa se realizó la elección de 81 muestras tomada de un núcleo ubicado en la zona de estudio, dichas muestras fueron tomadas de los intervalos más continuos cada 4 pies, abarcando un total de 323 pies, tomadas del pozo A.

La toma de las muestras se realizara mediante el siguiente procedimiento (figura 2.1):

- Primero se desplegaron los núcleos correspondientes a los intervalos seleccionados.
- Seguido se tomó la primera muestra en el tope del intervalo inicial seleccionado recolectando aproximadamente 15 gr. con un saca muestra, no contaminada con lodo de perforación. Posteriormente la muestra se colocó en una bolsa perfectamente rotulada con número de muestra, nombre del pozo y profundidad.
- A partir de la primera muestra se midió la distancia de 4 pies para tomar la segunda muestra, esto se realizó continuamente hasta cubrir todo el intervalo seleccionado.



Figura 2.1. Toma de muestra a partir del núcleo

- A cada muestra se describió detalladamente utilizando una lupa de 10X, tomando en cuenta la litología, mineralogía, tamaño de grano, grado de impregnación y color.



Figura 2.2. Descripción visual utilizado lupa de 10X

2.3.2. Preparación de muestra

- Las muestras se colocaron a secar de forma natural durante 48 horas.
- Las muestras que poseen un alto grado de impregnación de hidrocarburo se calentaron a 80° C por aproximadamente 2 horas, con el fin de quemar la materia orgánica presente, para su posterior molienda.
- Las muestras se analizaron mediante Fluorescencia de rayos X, para ello las mismas, se procesaron como se observa en la figura 2.2.

Se pulverizan aproximadamente 6 gr de la muestra mediante la utilización de un mortero de ágata y molino SPEX	
Molino SPEX	
Se hicieron pasar los 6 gr. de muestras molido a través de un tamiz N° 120	
Las muestras ya pulverizada se colocaron en recipientes para hacer FRX	

Figura 2.3. Preparación de la muestra para ser analizada por FRX

2.3.3. Análisis químico por Fluorescencia de rayos X

- Se utilizó un espectrómetro de FRX-DE, marca Phillips (Minipal PW4025) el cual se encuentra en el Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, UCV. Las aplicaciones necesarias para cada análisis son realizadas a través de un “software” que posee el equipo (Minipal Software 1.0 A, 1999). El mismo, detecta y cuantifica elementos químicos, en una muestra con un amplio rango de formas físicas: sólida, líquida o en polvo (figura 2.2.) (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).



Figura 2.4. Equipo de fluorescencia de rayos X.

- Se obtuvieron los porcentajes en peso de los siguientes óxidos elementales: **SiO₂**, **TiO₂**, **Al₂O₃**, **Fe₂O_{3T}**, **MnO**, **CaO**, **MgO**, **K₂O** y **V** en ppm.

2.3.4. Petrográficas

- Se realizaron los análisis petrográficos de 13 muestras tomadas en distintas arenas a lo largo del núcleo estudiado (figura 2.5). Con el fin de comparar con las litologías propuestas por la clasificación geoquímica de HERRON (1988) aplicadas a los datos del perfil de espectroscopía elemental.

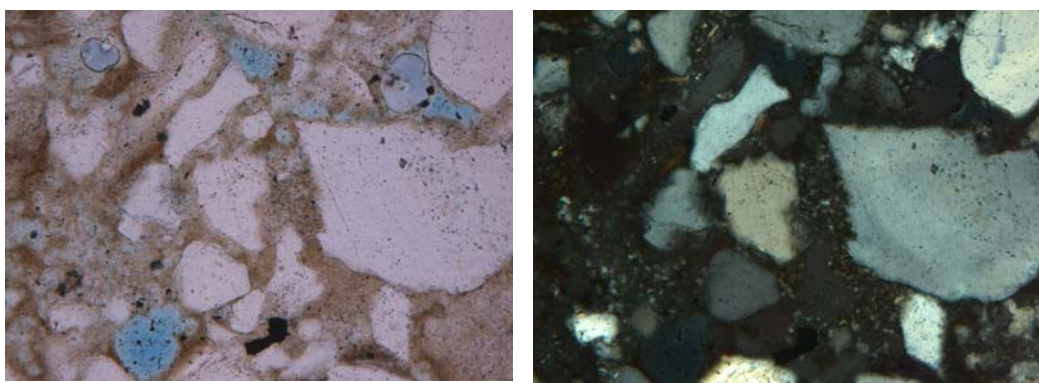


Figura 2.5. Petrográficas izquierda nicoles paralelos y derecha nicoles cruzados

2.4. FASE 3: *Validación de la herramienta de espectroscopía elemental*

La validación de los datos que arroja la herramienta de espectroscopía elemental se realizó basada en los resultados de las muestras analizadas a través de Fluorescencia de Rayo X. De la siguiente manera:

- Los valores obtenidos por medio de la fluorescencia de rayos X se expresan en óxidos y los valores obtenidos por la herramienta de espectroscopia elemental se encuentra en porcentaje en peso de cada elemento; por ello fue necesario colocar los datos de la FRX en la misma unidad para realizar la comparación. Se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$X\% = n * X / X_n O_m$$

X: Elemento
X_nO_m: Óxido

- La resolución de la herramienta de espectroscopia elemental es de dos pies aproximadamente, por lo cual se verificó correctamente el intervalo representado por la herramienta que incluya la muestra tomada en un punto específico.
- Posteriormente se procedió a comparar los valores y determinar el porcentaje de dispersión de los datos.
- Construcción de perfiles verticales por elementos a partir de FRX y de la herramienta de espectroscopía elemental.

- Se estableció correspondencia entre los perfiles verticales de FRX y de la herramienta de espectroscopia elemental.
- Mediante la comparación realizada en el paso anterior los valores de la herramienta de espectroscopia elemental fueron calibrados y corregidos.
- Posteriormente con los valores de la FRX y los del perfil se realizaron un grupo de comparaciones visuales mediante perfiles verticales y de frecuencia acumulada para determinar la dispersión entre ellos.

2.5. FASE 4: *Procesamiento Geoestadístico de los datos e interpretación geológica*

La etapa de procesamiento de datos consistió en tratar de agrupar y realizar análisis exploratorios a los resultados obtenidos por el registro de Espectroscopía Elemental. Este análisis, fue realizado utilizando métodos estadísticos univariantes, bivariantes y multivariantes, a través de los cuales se generaron histogramas de frecuencia, diagramas de dispersión, análisis de agrupaciones y funciones discriminantes.

Adicionalmente a los análisis estadísticos se construyeron perfiles de frecuencia acumulada, estos muestran de forma gráfica la variación de las concentraciones de los componentes químicos a lo largo de la secuencia estratigráfica. En base al comportamiento de estas curvas es posible la definición de posibles unidades químicas, las cuales presentan características químicas distintivas.

2.6. FASE 5: *Procesamiento e interpretación de datos de pozos vecinos*

En esta fase se procedió a realizar una selección de tres pozos vecinos, en los cuales se cuentan con registros de espectroscopia elemental. Posteriormente se realizaron un procesamiento de los datos de campo para obtener la información química a través del programa procesamiento de datos del perfil.

Con esta información obtenida se realizó un ensayo de correlación entre las unidades de los pozos estudiados.

2.7. FASE 6: *Determinación del alcance del perfil de Espectroscopía Elemental*

En esta etapa se definieron las fortalezas y posibles limitaciones de la información obtenida por los perfiles de espectroscopía elemental en la caracterización química realizada en el área de estudio.

CAPÍTULO III

GEOLOGIA REGIONAL

3.1 CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA

3.1.1. Generalidades

La Cuenca Oriental de Venezuela es una depresión estructural ubicada en la región centro-este del país, entre las coordenadas: 8° y 11° de latitud norte y 61° y 66° de latitud oeste. Comprende los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, así como la extensión meridional de los estados Sucre y Delta Amacuro, prolongándose mar adentro hacia la plataforma Deltana y el sur de Trinidad (GONZÁLEZ DE JUANA *et al.*, 1980).

PARNAUD *et al.*, (1999) plantean que la Cuenca Oriental venezolana es una cuenca antepaís flexurada (“foreland”), que se desarrolló durante el Neógeno sobre un antiguo margen pasivo mesozoico del cratón suramericano. El área total, tanto costa-afuera como costa-adentro, se aproxima a los 200.000 km². Esta cuenca es elongada y asimétrica, contiene alrededor de 8 km. de espesor de sedimentos terciarios, por encima del basamento ígneo – metamórfico del cratón guayanés localizado al sur de río Orinoco (DI CROCE *et al.*, 1999). Se encuentra limitada estructuralmente al norte por la falla del Pilar, al sur por el lineamiento del Baúl, que la separa de la cuenca Barinas-Apure (figura 3.1.).

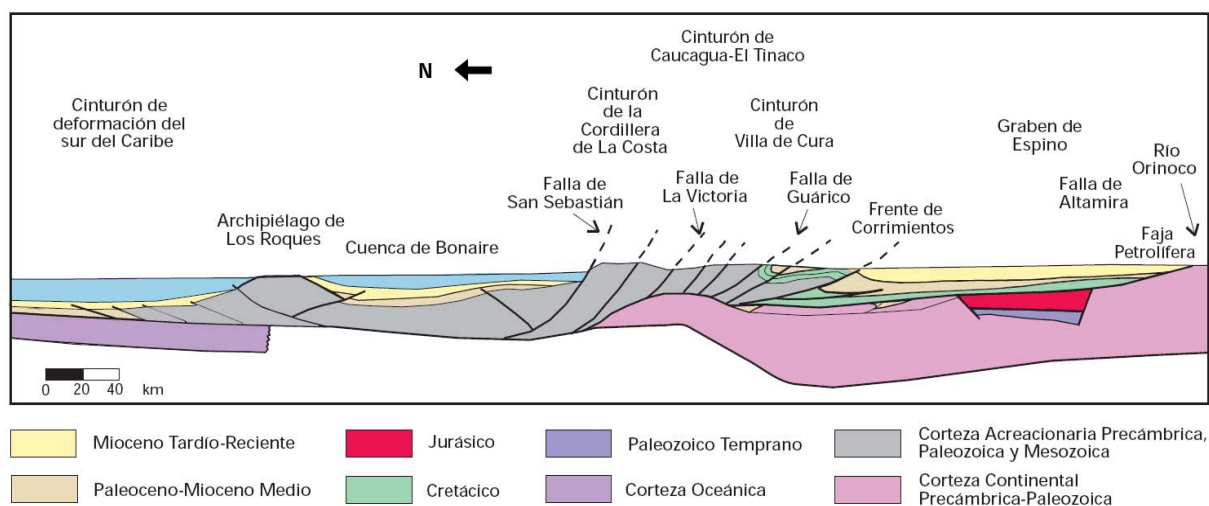


Figura 3.1. Perfil de la Cuenca oriental de Venezuela (tomada de YORIS *et al.* 1997)

La Cuenca Oriental de Venezuela costa-adentro está subdividida en dos subcuencas: la Subcuenca de Guarico al oeste y la cuenca de Maturín al este. Estas cuencas están separadas por estructuras complejas asociadas al sistema de fallas de Anaco y sus estructuras de inversión asociadas (DI CROCE *et al.*, 1999).

La estratigrafía de la Serranía del Interior Oriental representa una buena parte de la sedimentación del flanco norte de la Subcuenca de Maturín caracterizado por una espesa y compleja secuencia sedimentaria que abarca desde el Cretácico Temprano en su parte inferior, hasta el Pleistoceno. En cambio, el flanco sur presenta una estratigrafía más sencilla, semejante a la estratigrafía de la Subcuenca de Guárico en el subsuelo, con el Grupo Temblador en su parte inferior, como el representante del Cretácico, y una sección terciaria suprayacente de edad fundamentalmente Oligoceno-Pleistoceno, en la que se alterna ambientes fluvio-deltaicos y marino someros hasta su relleno final por ambientes continentales (OSTOS Y YORIS, 1997).

3.1.2. Evolución Geodinámica Regional:

Según EVAL *et al.*, (1989) en PARNAUD *et al.*, (1999) en la Cuenca Oriental de Venezuela se reconocen cuatro etapas geodinámicas mayores que se describen a continuación (figura 3.2.):

a).- **Etapas Pre-Rift:** mediante la utilización de líneas sísmicas se identificó esta secuencia pre-“rift” de edad Paleozoica, caracterizada por las formaciones Carrizal y Hato Viejo de la subcuenca de Guárico depositadas en ambientes marino costero a nerítico. Esta secuencia tiene un espesor que varía entre 3000-5000 m.

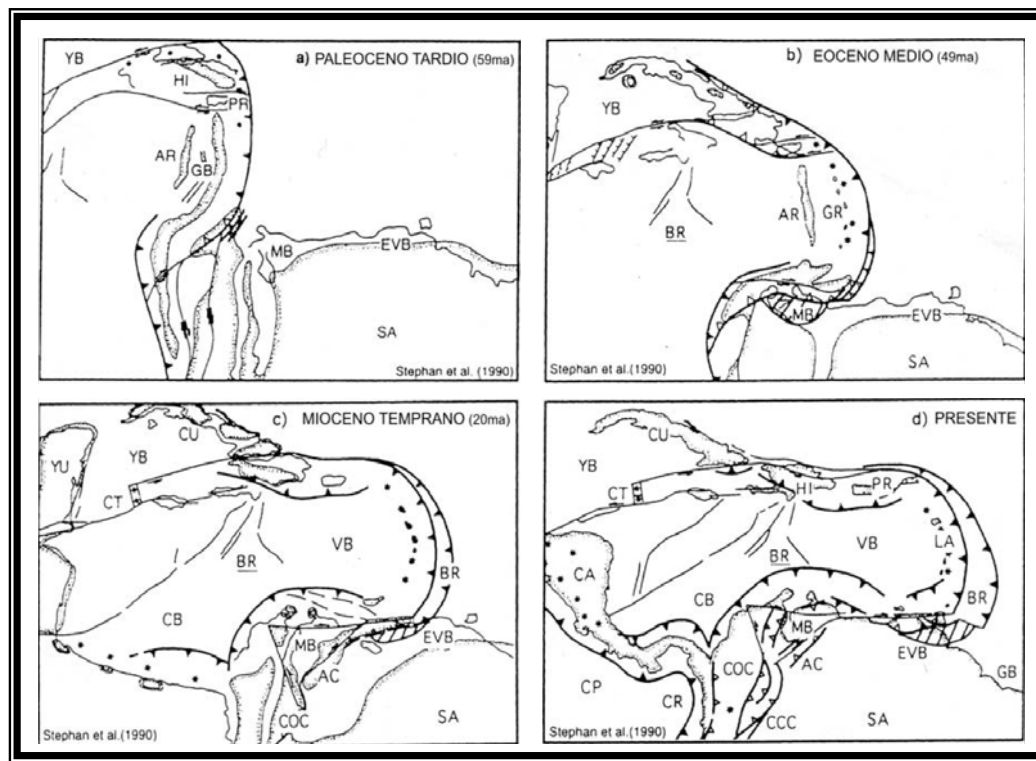
b).- **Etapas Rift:** La Formación La Quinta (redefinida como la Formación Ipire actualmente) y el basalto de Altamira representan la secuencia “rift” desarrollada durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, al oeste del graben de Espino, asociada con la separación de Pangea. Esta secuencia fue depositada en un ambiente continental, se encuentra conformada por capas rojas y mantos de basaltos con un espesor de 3600 m

c).- ***Etapas de Margen Pasivo:*** Esta etapa se desarrolla entre el Jurásico Tardío al Oligoceno. Posterior a la fase de extensión se produjo una fase de subsidencia del margen pasivo. Durante el Campaniense finalizó la separación entre el norteamérica y suramérica, durante el cual ocurre la colisión del arco de isla de las Antillas Mayores con el margen de norteamérica y suramérica (Venezuela). La deformación transpresional consecuencia de la colisión ocurre desde el Paleoceno Tardío hasta el reciente, avanzado diacrónicamente. Este episodio se encuentra representado por tres fases transgresivas que se desarrollaron de norte a sur y culminan durante el Turoniense, Paleoceno Temprano y el Oligoceno respectivamente. La primera fase se inicia con la depositación de las areniscas basales de la Formación Barranquín. En la parte sur de la cuenca, la Formación Tigre indica el máximo avance de la transgresión durante el Turoniense. Durante el Paleoceno-Eoceno se desarrolló la próxima transgresión posterior a la regresión del Maastrichtiense y representada por la Formación San Juan. La última transgresión se desarrolla durante el Oligoceno, está representada por la depositación de las arenas basales de la Formación Merecure, características de un ambiente continental hacia la parte sur de la cuenca (área de Carabobo) y ambientes plataformales internos hacia la parte norte (afloramiento de la Serranía del Interior).

d).- ***Etapas de Colisión Oblicua:*** posterior a la etapa de margen pasivo que finaliza en el Oligoceno, comienza la etapa de colisión que se desarrolla durante el Mioceno Temprano hasta el Reciente. El margen pasivo se transforma en un frente de corrimientos y en una cuenca antepaís; esto se debe al choque oblicuo de la Placa del Caribe con la Placa suramericana. Esta colisión oblicua migró progresivamente hacia el este dividiendo la cuenca antepaís en tres áreas: un área al sur (desde Cerro Negro hasta Oritupano) que corresponde a zona de plataforma, un área central (desde Acema-Casta a Pirital) correspondiente al “foredeep”, y un área al norte (norte de la falla de Pirital) correspondiente al área de cabalgamientos.

DI CROCE *et al.* (1999) define esta última etapa como margen activo constituido por un desplazamiento hacia el este de una cuenca “foredeep” flexural, la cual se inicia en el

Paleoceno Temprano en el oeste de Venezuela, avanzando diacrónicamente hacia el este continuando hasta hoy día.



Legenda:

SA: Sur América

BM: Bloque de Maracaibo

TU: Yucatán

CEV: Cuenca Este de Venezuela

AM: Antillas Menores

FL: Florida

RA: Ridge de Aves

CG: Cuenca de Granada

CA: Cordillera Andina

AC: América Central

PN: Placa de Nazca

PC: Placa de Coco

Figura 3.2. Desarrollo del borde sur del Caribe Durante el Eoceno Medio al Presente. Tomado de DI CROCE et al. (1999)

Las formaciones que se estudiarán en este trabajo de grado se encuentran localizadas en la etapa de colisión oblicua.

3.2. ESTRATIGRAFIA REGIONAL DE LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO (F.P.O.)

En la parte más septentrional de la F.P.O. específicamente hacia los sectores de Carabobo y Ayacucho, los sedimentos terciarios se encuentran suprayaciendo discordantemente a una franja relativamente poco espesa de sedimentos cretácicos que, a su

vez, se adelgazan antes de desaparecer hacia el sur, sitio desde donde el Terciario reposa en discordancia por encima del basamento ígneo – metamórfico (AUDEMARD, 1985).

Esta situación varía notablemente hacia el oeste de la F.P.O. (Boyacá y Junín), donde la secuencia terciaria reposa sobre un intervalo de mayor espesor de sedimentos cretácicos, paleozoicos y jurásicos. Estas dos últimas secuencias se localizan en una depresión profunda de rumbo regional ENE, la cual se encuentra limitada en sus flancos y perturbada en su parte central por importantes sistemas de fallas de rumbo de gran longitud, orientados aproximadamente en dirección este – noreste (AUDEMARD, 1985).

La columna sedimentaria del Terciario en la F.P.O. está constituida por tres ciclos de transgresión – regresión, además de la Formación Las Piedras (Plioceno). El ciclo más antiguo corresponde al Oligoceno y las otras dos al Mioceno (figura 3.3.). Las secuencias pertenecientes al Paleoceno y Eoceno conocidas en la parte norte de la Cuenca Oriental no parecen haber sido depositadas en el sur en lo que conocemos como F.P.O., o quizás se depositaron y fueron erosionadas antes de la transgresión del Oligoceno (AUDEMARD, 1985).

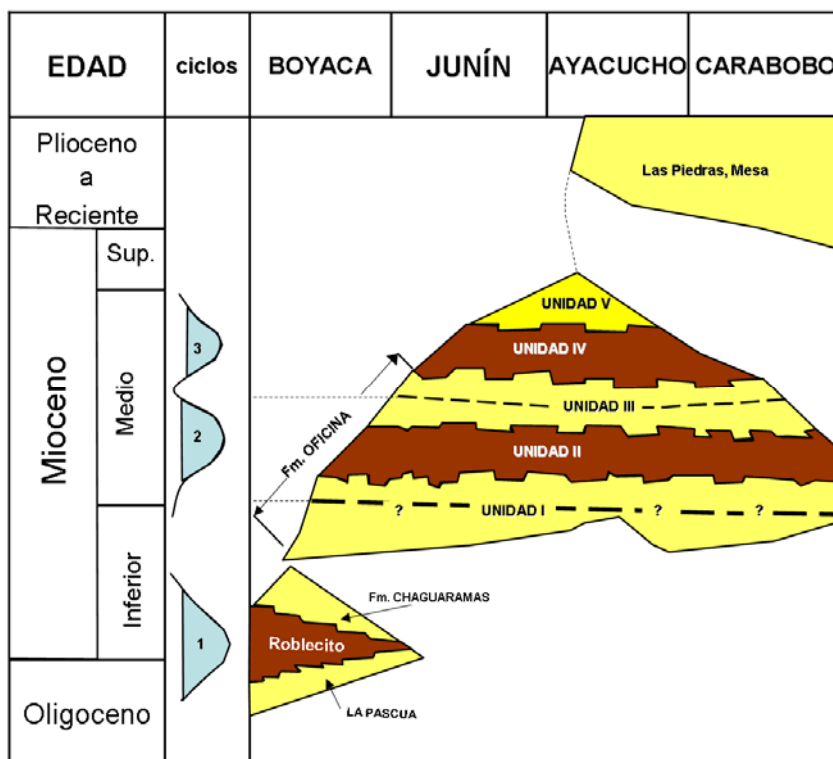


Figura 3.3. Edad de los ciclos transgresivos de terciarios reconocidos en la F.P.O. sección este-oeste (Modificado de AUDEMARD, 1985)

El ciclo 1 o del Oligoceno está constituido por la formaciones *La Pascua*, *Roblecito* y *Chaguaramas*. Los ciclos del Mioceno son dos: el ciclo 2 tiene su pico máximo de transgresión en la parte inferior del Mioceno Medio y corresponde a la mayor parte de la Formación Oficina; el ciclo 3 tiene el pico máximo de la transgresión en la parte superior del Mioceno Medio y comprende la parte superior de la Formación Oficina y la Formación Freites (AUDEMARD, 1985).

En la parte central de la Cuenca Oriental existe un ciclo con un pico transgresivo en la parte media del Mioceno temprano, el cual; no se reconoce en la F.P.O., probablemente debido a su no sedimentación. Los ciclos del Mioceno se han subdividido en 5 unidades litoestratigráficas correlacionables regionalmente, de carácter informal, las cuales representan intervalos mayores alternados de areniscas y lutitas (AUDEMARD, 1985).

El ciclo 2 comienza con un intervalo basal predominantemente arenoso (Unidad I), el cual pasa hacia arriba a un intervalo predominantemente lutítico (Unidad II); estas lutitas representan la máxima transgresión de este ciclo. Subiendo en sección, las lutitas gradan a areniscas regresivas, las cuales a su vez están cubiertas por areniscas que indican el comienzo del ciclo 3. Estos dos paquetes arenosos constituyen el conjunto denominado Unidad III (AUDEMARD, 1985).

Debido a que los ciclos 2 y 3 se encuentran dentro de la Unidad III, la ubicación es difícil de determinar. Hacia arriba en la sección, las arenas de la Unidad III gradan a lutitas de la Unidad IV, la cual corresponde a la Formación Freites que representa la máxima transgresión del ciclo 3, y son cubiertas a su vez por areniscas regresivas de la Unidad V (AUDEMARD, 1985)

3.2.1. Oligoceno (Ciclo 1):

Este es el ciclo más antiguo del Terciario que puede ser identificado en la F.P.O.; parece estar más o menos restringido a tres formaciones, La Pascua, Roblecito y Chaguaramas (equivalente lateral de la Formación Oficina). Se distribuyen en el área de Boyacá

(antiguamente Machete) y en la parte noroeste de Junín (antiguamente Zuata); su espesor llega alcanzar hasta 3000' en el norte (AUDEMARD, 1985).

El ciclo trasgresión – regresión del Oligoceno suprayace discordantemente a depósitos más viejos (Cretácico o pre-Cretácico) o al basamento. Se postula un contacto superior discordante con sedimentos del Mioceno. Existe una erosión progresiva del ciclo 1 hacia el sur y el este anterior a la sedimentación de la fase transgresiva de la Unidad I, en el cual se sigue perfectamente del este al oeste. Mientras que las arenas de la Formación Chaguaramas se acuña hacia el este y sur (AUDEMARD, 1985).

3.2.1.1. Formación La Pascua:

Representa la parte basal del ciclo, y se caracteriza por arenas transgresivas. Su espesor máximo se ubica en la parte central de área de Boyacá y varía entre 400' y 450'. La unidad se adelgaza hacia el suroeste y desaparece por erosión hacia el suroeste (área de Junín) y el noroeste (área de Boyacá). En base a las correlaciones estructurales se la extiende hacia el sur del área de Boyacá, pero se dificulta su identificación de las arenas basales del Ciclo 2 suprayacente, debido a que la respuesta de los perfiles de pozo no permite una delimitación precisa. La mayoría de las arenas de la Formación La Pascua persiste lateralmente como mantos de arenas transgresivas (“transgressive sheetsands”) con tendencia preferencial este – oeste, reconociéndoseles como depósitos de llanura costera en un sistema playa – isla de barrera. Estableciendo para esta formación un ambiente de sedimentación de laguna o estuario (AUDEMARD, 1985).

Se consideran mantos de arena (“sheet sands”) representando barreras de arena fósiles, siendo probable que pertenezcan a depósitos de entrada de marea (“tidal inlet”) y de ante playa baja (“lower – shoreface”), debido a que en un patrón transgresivo, dicha barreras tienden a ser destruidas por la erosión de la cara frontal de la barra (“shoreface erosion”) y la migración lateral de los entrada de mareas (“tidal inlet”) (AUDEMARD, 1985).

3.2.1.2. Formación Roblecito:

Esta formación representa el pico máximo de la transgresión de ciclo 1 (Oligoceno). Es una secuencia lutíticas que alcanza espesores de hasta 1900' en el norte del área de Boyacá. Hacia el este pasa lateralmente a secuencias arenáceas y se acuña rápidamente hacia el sur indicando que la línea de la playa para el momento de su sedimentación no llegó a alcanzar las márgenes del río Orinoco actual (AUDEMARD, 1985).

La Formación Roblecito aparece en contacto transicional sobre la Formación La Pascua e infrayece concordantemente la Formación Chaguaramas. Se le atribuye a un ambiente de sedimentación de plataforma nerítica restringida, en base a sus características litológicas, configuraciones de facies en la correlación y fauna marina.

3.2.1.3. Formación Chaguaramas:

La Formación Chaguaramas se refiere a las arenas básales, el resto corresponde a las Unidades I y II del ciclo 2 del Mioceno, equivalente a la Formación Oficina.

Dentro del ciclo 1, la Formación Chaguaramas corresponde a la secuencia de arenas regresivas posterior a la Formación Roblecito. Su espesor inicial se desconoce debido a la discordancia postulada; no obstante su máximo espesor oscilar entre 600' y 800'. La unidad aflora hacia el Noroeste y se acuña por truncamiento erosivo hacia el este y sur del área de Boyacá, y pasa a facies más lutíticas hacia el norte (AUDEMARD, 1985).

En la base de la secuencia de la Formación Chaguaramas se puede observar arenas de extensión laterales menos persistentes que las arenas de la Formación La Pascua; esto indica una menor influencia marina durante su sedimentación. Se le interpreta como depósitos de barrera de desembocaduras y depósitos de playa baja (AUDEMARD, 1985).

3.2.2. Mioceno (Ciclos 2 y 3):

El ciclo 2 está constituido por la Unidad I y II y la parte inferior de la Unidad III. El ciclo 3 está constituido por la parte superior de la Unidad III, y por las Unidades IV y V. (figura 3.4.).

3.2.2.1 Unidad I

Se trata de una unidad predominantemente arenosa que descansa discordantemente sobre sedimentos más antiguos y basamento. Es llamada Miembro Morichal de la Formación Oficina en Carabobo, Formación Merecure en Ayacucho (AUDEMARD, 1985).

En el tope de la Unidad I puede ser correlacionado fácilmente a través de la F.P.O. La base presenta buena correlación desde Carabobo, a través de Ayacucho, hasta Junín. Más hacia el oeste, en el área de Boyacá, la definición de la parte basal se dificulta debido a que su límite se encuentra dentro de un intervalo arenoso.

La unidad se adelgaza hacia el sur, hasta desaparecer debido a su no sedimentación. Hacia el norte, la unidad se hace más gruesa (norte de Junín y norte de Boyacá). Más al norte, ya fuera de las áreas de Carabobo y Ayacucho pero todavía dentro de Junín y Boyacá, la unidad se adelgaza rápidamente y se hace más lutítica (AUDEMARD, 1985).

Desde el punto de vista sedimentológico, la Unidad I puede ser dividida en dos subunidades: la inferior, progradante, de areniscas masivas, y la superior, transgresivas, de areniscas y lutitas interlaminadas. Es probable que entre ambas exista localmente una discordancia, la parte progradante podría corresponder a la fase regresiva entre el ciclo 1 y 2, o posible remanentes de un ciclo intermedio no definido en la F.P.O. en una extensa zona en las áreas de Carabobo y Ayacucho y, en general hacia el sur de la F.P.O., la subunidad progradante está ausente y la subunidad transgresiva descansa directamente sobre el basamento (AUDEMARD, 1985).

La subunidad progradante muestra importantes y rápidas variaciones en los espesores, desde 0' hasta 800', especialmente en las áreas de Junín y Boyacá. Estas variaciones indican que esta subunidad constituye el relleno de una paleotopografía. La parte transgresiva es más uniforme, con variaciones menores de espesores, los cuales en general varían entre 0' y 300'. La tendencia general de esta última indica un mayor espesor hacia el norte, a expensas de la parte progradante (AUDEMARD, 1985).

3.2.2.2. Unidad II

Esta unidad representa el pico máximo del Ciclo 2 del Mioceno en la F.P.O. Es una unidad predominantemente lutítica, conocida como la parte media de la Formación Oficina. Esta secuencia lutítica constituye el principal sello de las acumulaciones de petróleo que se encuentran en la unidad infrayacente a la cual cubre concordantemente (AUDEMARD, 1985). La Unidad II es fácilmente correlacionable en sentido este – oeste desde Carabobo hasta Junín. Su correlación se dificulta en el área de Boyacá. La unidad se hace más gruesa rápidamente en el noreste del área de Carabobo, a todo lo largo del norte de Ayacucho y Junín (AUDEMARD, 1985).

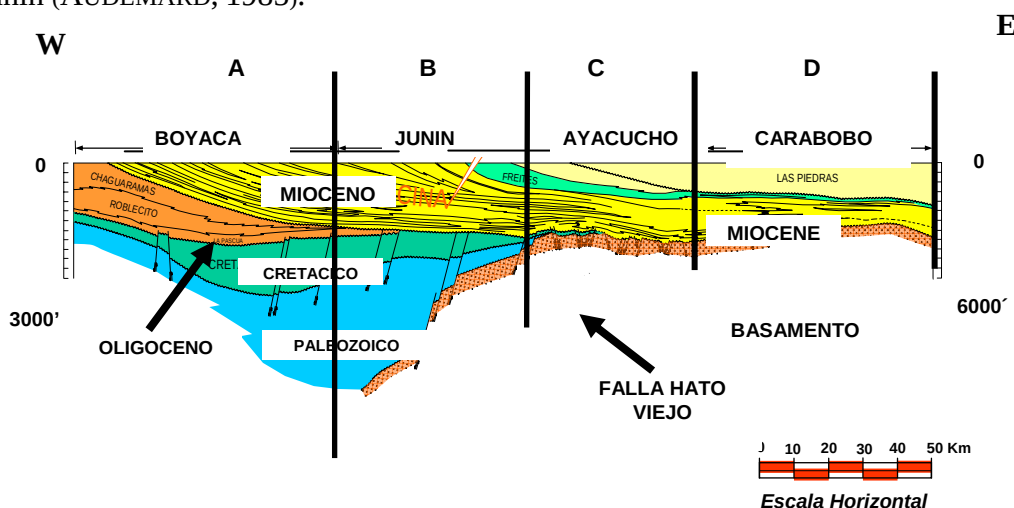


Figura 3.4. Estratigrafía Regional de la F.P.O. tomado de BEJARANO 2006

Hacia el sur se extiende hasta el río Orinoco donde desaparece por acuñamiento, evidenciando que allí se encontraba aproximadamente la línea de la playa para la época de

sedimentación de esta unidad. Sedimentalógicamente se caracteriza por ser una secuencia lutítica con intercalaciones ocasionales de areniscas y limolitas (AUDEMARD, 1985).

La configuración semicerrada de la cuenca como la postulada para la Unidad I, es válida para sustentar que hacia el oeste del área la fuerza de las mareas jugó un papel más importante en la sedimentación que en el este.

3.2.2.3 Unidad III:

Esta es una secuencia predominante arenosa, incluida entre el pico de la transgresión del Ciclo 2 (Unidad II) y el pico de la transgresión del Ciclo 3 (Unidad IV) (AUDEMARD, 1985).

De esta manera la unidad indica el pico de la regresión del Mioceno Medio. Es conocida como la parte superior de la Formación Oficina superior. En general, la unidad cubre concordantemente la Unidad II; sólo discordancias locales fueron identificadas. La unidad está cubierta concordante por la Unidad IV (Formación Freites) (AUDEMARD, 1985).

En las áreas Carabobo y este de Ayacucho su espesor se reduce hacia el sur como consecuencia de la erosión pre – Las Piedras. En la zona noroeste y oeste de Boyacá la unidad está completamente erosionada.

Las arenas de la parte basal de la Unidad III son lateralmente persistentes y pueden ser seguidas por más de 80 km en dirección este-oeste y 40 km en dirección norte – sur (AUDEMARD, 1985).

Son mantos de arena pertenecientes a un delta progradante. Estas arenas de tendencia este – oeste son paralelas a la que una vez fue la línea de playa en un sistema playa – isla de barreras de pasaje de marea, acarreos de tormenta y barreras. Estas arenas de barrera se preservan más en un sistema regresivo que en uno transgresivo. Los mantos de arenas están interstratificados con lutitas, las cuales se atribuyen a depósitos de laguna, rellenos de bahía y de plano deltaico y sus respectivas facies asociadas (AUDEMARD, 1985).

3.2.2.4. *Formación Oficina:*

HEDBERG (1950) describe la Formación Oficina como una alternancia de lutitas grises, gris oscuro y gris marrón, intercaladas e interestratificadas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso. Componentes menores, pero importantes de la unidad, son las capas delgadas de lignitos y lutitas ligníticas, arcilitas verde y gris claro, con esférulas de siderita, areniscas siderítico-glaucóníticas y calizas delgadas con estructuras cono en cono.

AUDEMARD *et al.* (1985) describen la Formación Oficina de la Faja Petrolífera del Orinoco, dividiéndola en tres unidades: la Unidad I (Miembro Morichal del área de Carabobo; Formación Oficina Inferior en Junín) caracterizada por areniscas masivas progradantes y la intercalación de lutitas y areniscas transgresivas; la Unidad II (Miembro Yabo del área de Carabobo; Formación Oficina media en Junín) representa una secuencia lutítica con intercalaciones ocasionales de areniscas y limolitas; la Unidad III (miembros Jobo y Pilon del área de Carabobo; Formación Oficina superior de Junín) es una secuencia predominantemente arenosa.

Para HEDBERG *et al.* (1947) la sedimentación de la Formación Oficina se inicia en condiciones de aguas dulces o salobres, continuando con repetidas alternancias de ambientes marinos someros, salobres y pantanosos; en general, las condiciones se hacen más marinas de oeste a este y de sur a norte. GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) y MÉNDEZ (1985), consideran que la Formación Oficina se sedimentó en un inmenso complejo fluvio-deltáico, donde son comunes las arenas lenticulares y de relleno de canales de ríos (figura 3.5.).

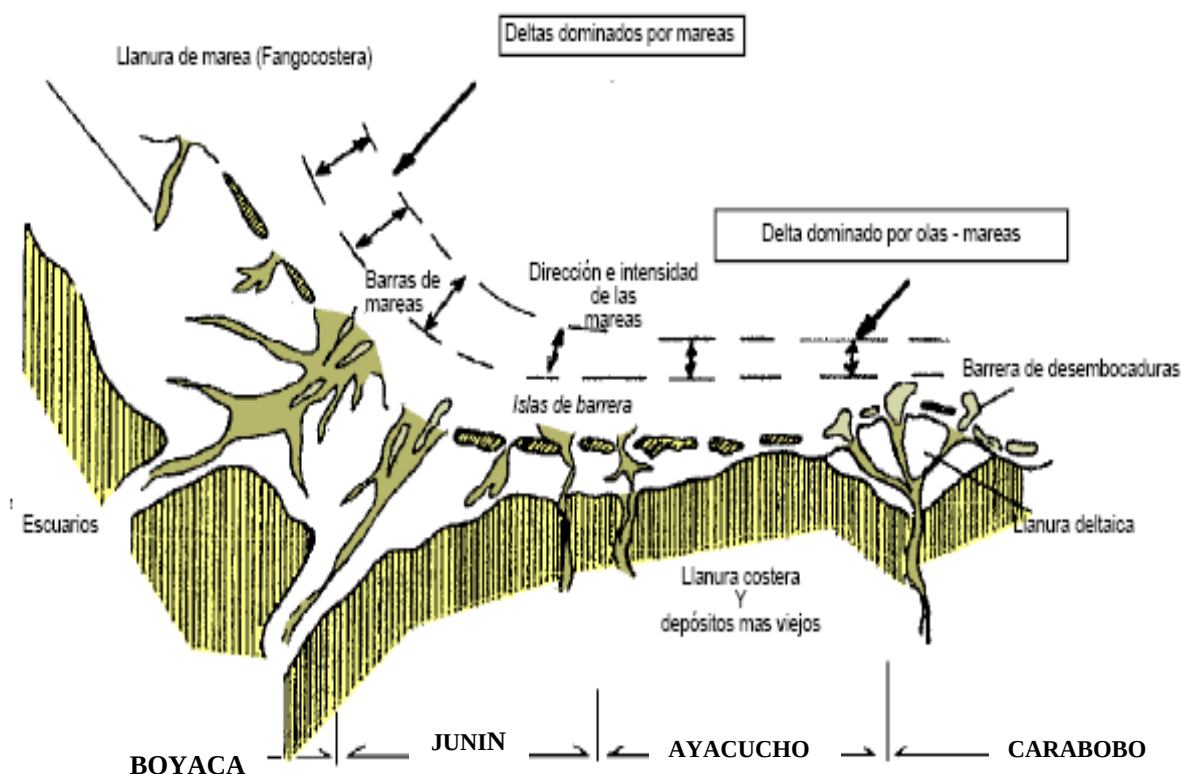


Figura 3.5. Paleoambientes de la F.P.O (AUDEMARD 1985).

Son mantos de arena pertenecientes a un delta progradante. Estas arenas de tendencia este – oeste son paralelas a la que una vez fue la línea de playa en un sistema playa – isla de barreras de pasaje de marea, acarreo de tormenta y barreras. Estas arenas de barrera se preservan más en un sistema regresivo que en uno transgresivo. Los mantos de arenas están interestrificados con lutitas, las cuales se atribuyen a depósitos de laguna, rellenos de bahía y de plano deltaico y sus respectivas facies asociadas (AUDEMARD, 1985).

Hacia el norte, el este y el oeste este cuerpo pasa mantos de arena, mientras que hacia el sur pasa a depósitos de canales distributarios, intercalados con depósitos de lodos de plano deltaico alto (AUDEMARD, 1985).

3.2.2.5. Unidad IV:

Esta unidad representa el pico máximo de la segunda transgresión mayor del Mioceno (Ciclo 3, parte superior del Mioceno Medio) que ocurre en la F.P.O. es una secuencia predominantemente lutítica, la cual corresponde a la Formación Freites (AUDEMARD, 1985).

Esta unidad subaflora en la esquina noroeste de Carabobo, norte de Ayacucho y noreste de Junín, donde no fue afectada por la erosión pre – Las Piedras y Reciente (AUDEMARD, 1985). Su espesor se incrementa gradualmente hacia el norte de Ayacucho, hacia el sur la transgresión no alcanzó el borde actual de río Orinoco, allí la secuencia desaparece por adelgazamiento sedimentario y no por erosión (AUDEMARD, 1985).

Por su carácter eminentemente lutítico y, la presencia de fauna marina y glauconita se concluye que el ambiente de sedimentación de esta unidad es nerítico.

3.2.2.6. Unidad V:

Esta es una unidad de arenas regresivas que cubren concordantemente la Unidad IV y constituye la frase regresiva del Ciclo 3. Sólo está presente en la parte norte de Ayacucho, la parte más noroeste de Carabobo y noroeste de Junín, donde no fue afectada por la erosión pre – Las Piedras y Reciente. La respuesta de los registros es mala y las arenas no pueden ser debidamente correlacionadas. La correlación por perfiles de rayos gamma revela que las arenas pueden representar mantos de arenas regresivos (AUDEMARD, 1985).

En muestras de canal de los pozos de Ayacucho se ha reportado fósiles marinos y glauconita, que evidencia el carácter marino de esta secuencia. No obstante el proceso de sedimentación no puede ser inferido (AUDEMARD, 1985).

3.2.3. Depósitos Post – Mioceno (Formación Las Piedras)

Es una unidad predominantemente arenosa de carácter continental que cubre discordantemente depósitos más antiguos en el área de Carabobo y Ayacucho. Hacia el oeste de Ayacucho, en Junín y Boyacá la unidad no subaflora (AUDEMARD, 1985).

La edad de esta unidad es definida en la literatura como Mioceno Tadio – Plioceno (AUDEMARD, 1985).

3.3. TECTÓNICA DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO:

Algunas fallas afectan a los sedimentos paleozoicos sin dislocar aparentemente al Terciario; en cambio, se detectan otras fallas, como la de Hato Viejo, que evidencian desplazamientos durante el Paleozoico y además afectan a los sedimentos de Terciario, por lo menos en su parte inferior y media, sin que el tope de la Formación Oficina sea perturbado (parte oriental de Junín). También se reconocen otras fallas que dislocan a la base del terciario más al oeste, como el caso de la Falla Sabán (Boyacá) (AUDEMARD, 1985).

Se considera en este estudio que la magnitud relativa del salto (vertical) de las fallas detectadas en estas áreas podría ser menor que el de un posible desplazamiento lateral de rumbo (AUDEMARD, 1985).

Los rangos mayores reconocidos dentro de marco regional de la F.P.O. permiten individualizar dos provincias estructurales y tectónicas (figura 3.6):

- Una **Provincia Oriental**, al este de la falla de Hato Viejo (áreas de Ayacucho y Carabobo), en donde el basamento ígneo – metamórfico se localiza poca profundidad y refleja una tectónica de zócalo con numerosas fallas que dislocan a la secuencia suprayacente del Terciario (AUDEMARD, 1985).

- Una **provincia Occidental** (Junín – Boyacá), la cual en su mitad norte evidencia la existencia del basamento ígneo – metamórfico a profundidades mayores de los 1000', infrayaciendo sedimentos de edad paleozoica y mesozoica. El fallamiento a nivel del basamento se amortigua dentro de esas secuencias sedimentarias, de tal manera que este tectonismo refleja poca o ninguna influencia en los sedimentos terciarios. Pocas fallas permanecieron activas durante la sedimentación del Terciario, y en su mayoría dislocan únicamente a la base de la secuencia, como es el caso de Hato Viejo (Junín – Ayacucho), que determina el límite entre las dos provincias tectónicas aquí definidas (AUDEMARD, 1985).

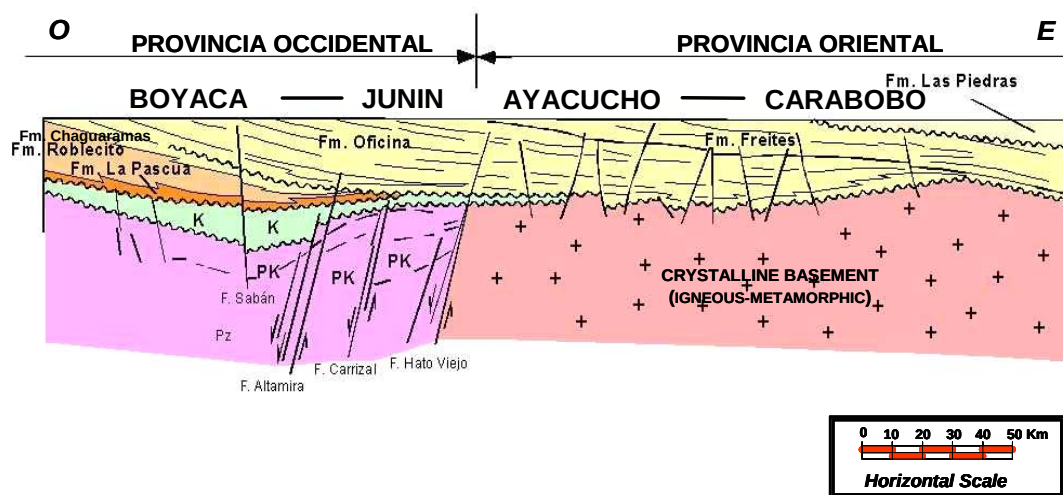


Figura 3.6. Configuración esquemática F.P.O (AUDEMARD 1985).

En la F.P.O. corresponde a una tectónica de fallas caracterizada por bloques rígidos sin plegamientos definidos. En promedio los saltos verticales de las fallas no exceden los 200', y estas son persistentemente de tipo tensional (normales), ya sea sintética o antitética. Asimismo se interpretan probables desplazamientos laterales. De hecho, se ha reconocido fallas denotadas como inversas al nivel del marcador tope Oficina, las cuales resultan ser normales a nivel del basamento (AUDEMARD, 1985).

Se observan fallas o sistemas de fallas del zócalo rígido que conforman verdaderas flexuras falladas debido a un cambio apreciable en los espesores de las unidades o

intervalos (línea de bisagra). Es muy importante que esas fallas no parecen ser activas durante la sedimentación (AUDEMARD, 1985).

En la parte de la F.P.O., donde la columna sedimentaria de Terciario no es muy espesa y descansa sobre el basamento, se observa un gran número de fallas que dislocan simultáneamente el basamento y al Terciario, refleja su actividad por lo menos hasta el nivel del marcado correspondiente al tope de Formación Oficina

3.4. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL DEL ÁREA DE DE JUNÍN

El área de Junín se encuentra en el flanco sur de la cuenca oriental de Venezuela. La secuencia sedimentaria de esta región comprende desde el Paleozoico hasta el Resiente la cual se encuentra suprayaciendo aun complejo de rocas ígneos – metamórficos del Escudo Guayana de edad Precámbrica. El la figura 3.7 se muestra una columna estratigráfica de las formaciones que conforman dicha área.

3.4.1. Paleozoico

El Paleozoico del área de Junín se encuentra conformado por las siguientes formaciones:

3.4.1.1. Formación Hato Viejo:

Esta formación corresponde a areniscas cuarzosas (ortocuarzitas) de color que va desde rosado, amarillo pálido a blanco amarillento, macizas y de grano grueso, de edad Cámbrico temprano. En algunas zonas la Formación Hato Viejo se encuentra en contacto de falla con la Formación Oficina. Las relaciones de estratigráficas de esta formación son concordantemente suprayacente a la Formación Carrizal y en concordante discordante con el basamento.

El ambiente de sedimentación es continental, y sus sedimentos representan el relleno de cuenca (facies fluvial y/o piedemonte) de una fase erosiva, contemporánea o subsiguiente a un período de intensa actividad tectónica

3.4.1.2. Formación Carrizal

Litológicamente esta formación está constituida por una espesa secuencia de argilitas verdes a gris verdosas, ocasionalmente teñidas de rojos, duras y compactas. Intercaladas en esta secuencia y generalmente hacia la base de la formación se han observado cuerpos de arenas. Esta formación es de edad Cámbrico Inferior.

Las estructuras sedimentarias sugieren, que estas litologías fueron depositadas bajo condiciones de ambiente marino (nerítico), en aguas someras y condiciones de corriente típicas de llanuras de marea.

3.4.2. Mesozoico

3.4.2.1. Formación Ipire (Capas Rojas):

Esta constituida por alternancia de areniscas y lutitas, de colores rojos y verdes típicamente correspondiente a secuencia de capas rojas. Arealmente esta formación esta restringida al “Graben de Espino”, estado limitada al sur por el sistema de falla de Altamira.

Los sedimentos inmaduros de la Formación Ipire, son de tipo molásico de relleno de graben continental (Graben de Altamira). El ambiente sedimentario es fluvial y lacustre, cambiante y efímero, con depositación rápida y continua y escaso transporte.

3.4.2.2. Basalto de Altamira

Ubicada al noroeste del área de Junín, se localizan rocas volcánicas intercaladas en la secuencia sedimentaria. Se trata de un basalto toleítico con tendencia alcalina, homogéneo, de grano muy fino, macroscópicamente equigranular, masivo, escasamente vacuolar y de color gris oscuro. No presenta indicios de metamorfismo.

El Basalto de Altamira es una efusión fisural, subaérea, estratiforme (basalto de plateau) y de carácter continental anorogénico, asociada al evento de rifting abortado, causado por la distensión y desacoplamiento de Suramérica-Africa del subcontinente norteamericano, ocurrido en el Jurásico.

3.4.2.3. Grupo Temblador

Discordante sobre la secuencia de capas rojas hacia el noroeste y sobre la Formación Carrizal en el resto del área, se encuentra una secuencia de sedimentos clásticos de edad cretácica pertenecientes al Grupo Temblador. Las cuales se denominan Formación Canoa y la Formación Tigre.

Formación Canoa

Litológicamente se caracteriza por la presencia de lutitas moteadas en colores abigarrados, intercaladas con areniscas cuarzosas generalmente arcillosas, representantes de ambiente de sedimentación continental.

Conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y arcillitas generalmente moteadas con manchas grises, gris verdoso, amarillo, marrón, rojo, púrpura (HEDBERG, 1950). Se encuentran también algunos intervalos de grano grueso, areniscas y limolitas blanquecinas, pulverulentas e intercalaciones de arcillita gris azulada, con restos de plantas (HEDBERG, *op. cit.*).

Formación Tigre

En el área de de Junín esta unidad está constituida por una sección predominantemente arenosa con intercalaciones de lutitas. Las areniscas suelen ser de grano medio a grueso, cuarzosa y sin presencia de cemento, donde la matriz arcillosa, generalmente abundante, actúa como material aglutinante.

Las lutitas son de color blanco a gris claro, debido al alto contenido de caolinita, mineral este que también se encuentra presenta en altas proporción en la matriz de las areniscas, impartándole su color blanquecino típico.

La Formación Tigre considerada de ambiente marino en el resto de la cuenca por la presencia de areniscas glauconíticas, lutíticas fosfáticas, calizas y restos fósiles, parece representar facies fluviales en el área de Junín.

3.4.3. Cenozoico

3.4.3.1. Formación Roblecito

Esta unidad fue inicialmente definida por HEDBERG (1950) con el nombre informal de “Lutitas de Roblecito”, posteriormente fue elevada a rango formacional definiéndola como una unidad lutítica limitada por dos secuencias arenosas: la Formación La Pascua en su base y la Formación Chaguaramas en el tope.

El tope de la Formación Roblecito parece estar restringido al Oligoceno.

3.4.3.2. Formación Oficina

Está presente en toda el área de Junín, sin embargo, su tope solo se presenta hacia la esquina noroeste del área, habiendo sufrido esta unidad una erosión parcial de su parte superior, alcanzando niveles más profundos hacia el sur y el oeste como tendencia general.

3.4.3.3. Formación Freites

Esta formación suprayace concordantemente a la Formación Oficina. En el área de Junín esta unidad solo se encuentra preservada hacia la esquina noreste debido a la extensa erosión reciente sufrida por toda la cuenca a partir del basculamiento de su eje hacia el este.

Formación Las Piedras:

El término Formación Las Piedras se emplea para definir un intervalo arenoso suprayacente a la Formación Freites que se encuentra en discordancia.

3.4.3.4. Formación Mesa

Bajo el nombre de Formación mesa se agrupa una serie de cuerpos clásticos aparentemente inconexos que se encuentra aflorando en forma dispersa en el área de Junín.

Edad			Formaciones	Litología General	Descripción	
Cenozoico	Terciario	Pleistoceno	Mesa		Arenas de grano grueso y gravas, ferruginosas, duras con conglomerados rojos a negros.	
		Neógeno	Plioceno	Las Piedras		Areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores grises interlaminada con lutitas gris a verdoso.
			Mioceno	Freites		Lutitas fisiles verdes a gris verdoso, con areniscas en el tope y la base.
		Oficina			Alternancia de lutitas grises intercaladas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso. También tiene capas delgadas de lignitos y lutitas carbonosas y arcillitas verde y gris claro.	
		Oligoceno	Merecure		Areniscas gris claro a oscuro masivas, duras, generalmente de grano fino a medio con estratificación cruzada.	
		Eoceno				
		Paleoceno				
Mesozoico	Cretácico	Superior	Grupo Temblador	Tigre		Areniscas glauconíticas de grano fino a medio, grises a verdosos, gruesas, friables y espesas.
				Canoa		Conglomerados y areniscas conglomeráticas, areniscas grises, amarillas, marrones y rojas.
		Inferior				
	Jurásico					
	Triásico					
Paleozoico	Pérmico					
	Carbonífero					
	Devónico					
	Silúrico					
	Ordovícico					
Precámbrico	P _e sin diferenciar	Cámbrico	Carrizal		Arcillitas verdosas a gris, duras y masivas, con algunas capas de limolita y areniscas.	
		Hato Viejo		Areniscas de grano fino a grueso de colores grisáceos. Friables, duras, macizas y ásperas.		
		Basamento ígneo – metamórfico sin diferenciar		Rocas ígneas y metamórficas, generalmente diabasas, granodioritas, granitos, pegmatitas, esquistos, cuarcitas, anfíbolitas y gneises diversos. Algunas se han correlacionado con el Complejo Imataca de edad Arqueano.		

	Basamento ígneo - metamórfico		Areniscas de grano medio
	Arenas de grano grueso		Areniscas de grano fino
	Lutitas, arcillitas y limolitas		No hay información de núcleo
	Alternancia lutitas y areniscas		Discordancias regionales

Figura 3.7. Columna estratigráfica del área de Junín (Tomado de DUGARTE 2008)

CAPÍTULO IV

MARCO TEÓRICO

4.1. Generalidades

Para la caracterización de unidades químicas dentro de una formación se requiere del conocimiento de distintos conceptos que se encuentran brevemente explicados en este capítulo.

4.2 Fluorescencia de rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de una corta longitud de onda y alta frecuencia, producida por la desaceleración de electrones de alta energía y/o por transiciones de electrones que se encuentran en los orbitales internos de los átomos (SKOOG *et al.*, 1992). Este tipo de radiación ocupa sólo una parte del espectro electromagnético y sus longitudes de onda varían entre 10 nm y 0,01 nm (1nm o nanómetro equivale a 10^{-9} m) (figura 4.1.).

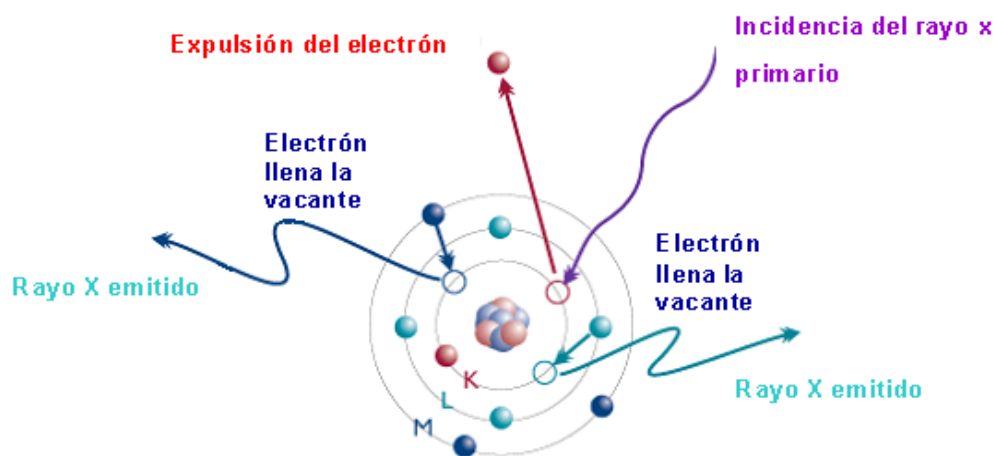


Figura 4.1. Generación de Rayos Gamma
(Tomado y modificado de NITON UK 2008)

El proceso busca hacer inestable la estructura del átomo, arrancando los electrones de la última capa, de esta forma, los electrones de capas internas sustituyen a los primeros

generando vacíos que se traducen en la minimización del nivel de energía. Dicha transición de un nivel a otro, hace que se libere energía pero en forma de fotones, y es conocida como emisión de fluorescencia o radiación secundaria, que presenta las características energéticas del átomo y cuya intensidad dependerá directamente de la concentración del mismo en la muestra (ROLLINSON, 1993).

La fluorescencia de rayos X (FRX) por dispersión de energía es la técnica de emisión secundaria de rayos X a través de la excitación de los átomos, que ocurre cuando los materiales son irradiados con un rayo proveniente de un tubo emisor de rayos X o gamma. Esta es la técnica analítica más usada en la determinación de componentes químicos mayoritarios y traza en muestras de rocas. En teoría puede analizar cerca de 80 elementos en un amplio rango de sensibilidad, detectando concentraciones en elementos con número atómico mayor que el sodio ($Z = 11$) (CEDILLO & OLAYA 2003).

Los materiales están compuestos por elementos, que al ser excitados a través de la irradiación con rayos X o gamma, emiten radiación fluorescente característica con una intensidad directamente proporcional a la concentración del elemento en el material (SKOOG *et al.* 1992). Dicha radiación es identificada y separada de acuerdo a su longitud de onda a través de detectores de dispersión de energía (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000) (figura 4.2.).

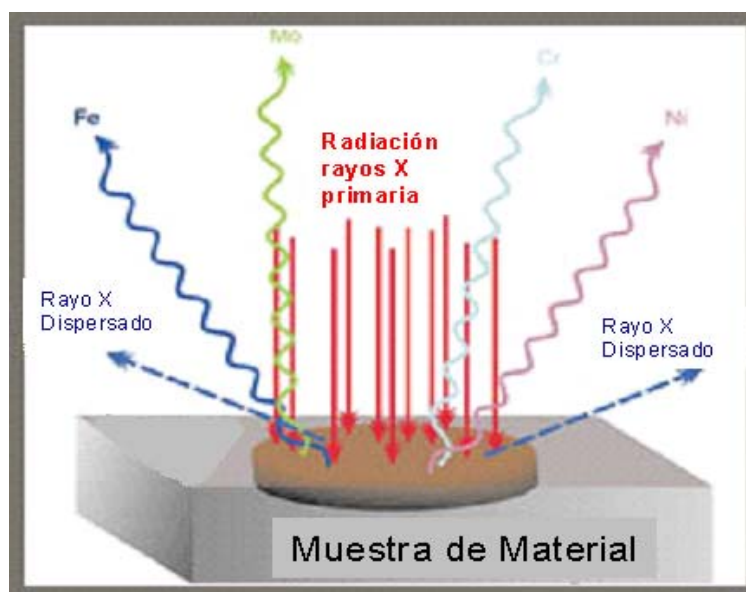


Figura 4.2. Ejemplo de cuantificación de elementos mayoritarios a partir de FRX (Tomado y modificado de NITON UK 2008)

Los espectros de rayos X son los resultados en forma cualitativa, donde los elementos en una muestra han sido detectados mediante el reconocimiento de los rangos de energía emitidos en keV. Para la obtención de alguna medida de concentración es necesaria la conversión de las intensidades mostradas por cada elemento, por lo que es necesaria la calibración o comparación de las intensidades de las muestras a ser analizadas, con intensidades de muestras patrones o estándar, con composición química y física similar (CAMPOSANO & MARTÍNEZ 2000).

4.2.1. Efectos de la matriz

Los espectros de rayos X producidos en un proceso de fluorescencia se generan tanto en los átomos de la superficie como en aquellos que se encuentran debajo de la superficie. Así, una parte del haz incidente y del haz fluorescente resultante atraviesan un espesor significativo de la muestra, en el que puede tener lugar la absorción y dispersión. El grado de atenuación de ambos depende del coeficiente de absorción del medio, el cual a su vez se determina a partir de los coeficientes de todos los elementos de la muestra. Por tanto, aunque la intensidad neta de una línea que llega al detector en una medida de fluorescencia los espectros de rayos X dependen de la concentración del elemento que produce la línea, también está afectada por la concentración y por los coeficientes de absorción de los elementos de la matriz provocando que los resultados calculados sean más altos o más bajos (CEDILLO & OLAYA 2003).

4.3. Geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada que trata con fenómenos que se manifiestan en el espacio (y / tiempo) y que poseen algún grado de continuidad o variabilidad ofreciendo la posibilidad de integrar los diferentes tipos de datos proveyendo un formalismo para codificarlos, el cual a su vez considera la incertidumbre implícita en la información y la transfiere a la predicción final (BARITTO 2003).

La geoestadística es una rama de la matemática aplicada por los profesionales de las Ciencias de la Tierra para el modelado de distribuciones espaciales (2D y 3D) de variables regionalizadas. Estas variables tienen propiedades intermedias entre lo puramente aleatorio y lo absolutamente determinístico y por consiguiente están caracterizadas por la presencia de incertidumbre (ALTUNA 2006).

4.3.1. Estadísticas Univariantes

Los estudios estadísticos se dividen en dos tipos, el primero es el tipo descriptivos que es aquel que resume la información y destaca las características más importante del grupo que se está estudiando; y está el tipo comparativos donde se busca si hay diferencias o no entre dos o más grupos y de existir las mismas se hallan las razones para hacerlas valederas para explicarlas (ARIZA, 2006).

4.3.1.1. Medidas de tendencia central

En la estadística descriptiva existen dos tipos de medidas que son de interés para cualquier conjunto de datos, la ubicación de su centro y su variabilidad. Lo que conlleva a explorar los datos de las muestras esencialmente se traduce en la presentación, ilustración y cuantificación de las características esenciales presentes en los datos de las muestras, su tendencia central, su dispersión, su correlación interna y en el caso particular del análisis geoestadístico su distribución espacial (CEDILLO & OLAYA 2003).

Las medidas de tendencia central muestran la disposición de un conjunto de datos a agruparse ya sea alrededor de un centro o de ciertos valores numéricos.

Media o promedio Constituye una de las medidas de tendencia central, las cuales tienden a localizar en algún sentido, la parte central de un conjunto de datos. Representa el promedio de los datos, correspondientes a una misma variable y se expresa como la sumatoria de cada uno de los datos u observaciones entre el número total de las mismas (CEDILLO & OLAYA

2003). Se define como la suma de todas las observaciones dividida por el número de observaciones (CÁMEL, 2002). Viene expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n xi / n$$

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 (CEDILLO & OLAYA 2003).

Moda Es el valor de la variable que presenta mayor frecuencia absoluta. Puede haber más de una (CEDILLO & OLAYA 2003).

4.3.1.2. Medidas de variabilidad

La *variabilidad* de un conjunto de datos es la dispersión de las observaciones en el conjunto (DAVIS, 1973).

Varianza Es el promedio del cuadrado de las distancias entre cada observación y la media del conjunto de observaciones (CEDILLO & OLAYA 2003). La cual se emplea para observar cómo los datos se separan de la media. La varianza se denota por:

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

Desviación estándar Constituye una medida de dispersión, las cuales dan idea de cómo se distribuyen los datos alrededor de las medidas de tendencia central. Es un índice numérico que permite establecer una cuantificación de la relación lineal existente entre dos variables. (CEDILLO & OLAYA 2003). Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza:

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

Covarianza 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 (CEDILLO & OLAYA 2003). Esta denotada por la siguiente fórmula:

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

4.3.2. Estadísticas Multivariantes

Los análisis estadísticos multivariantes involucran a más de una variable. El objetivo fundamental de este enfoque es identificar relaciones entre las variables. Estos métodos resultan muy eficaces ya que permiten manipular más variables de las que pueden ser asimiladas convencionalmente, sin embargo su estructura teórica y operacional resulta más compleja que las realizadas a una sola variable (CAMPOSANO & MARTÍNEZ, 2000).

4.3.2.1. Componentes principales

Los componentes principales de un grupo de variables no son más que los autovalores de una matriz varianza – covarianza. Todos los esquemas analíticos modernos emplean los componentes principales como un punto de inicio del análisis. Para graficar esto se utiliza un sistema de coordenadas donde la varianza de X1 se representa con una línea a lo largo del eje X1. Sin embargo, la variable X1 es covariante, o varía con cambios de la variable X2. Para representar esto, se puede graficar una segunda línea desde el final de varianza X1, paralela al eje X2. La longitud de esta línea es igual a la covarianza. Del mismo modo, la varianza de X2 puede ser graficada a lo largo del segundo eje, y ser ajustada en la dirección de X1 con una cantidad igual a la covarianza. Estos pasos se ilustran en la figura 4.3. (GONZÁLEZ & SÁNCHEZ 2001).

4.3.2.2. Funciones discriminantes

Son usados ampliamente en análisis geoquímicos ya que permite clasificar muestras de origen desconocido en grupos previamente establecidos, los cuales posteriormente pueden

indicar ambientes de sedimentación, roca fuente, unidades litoestratigráficas, etc. Estos, a su vez, permiten encontrar un conjunto de ecuaciones a partir de variables independientes. Este método radica en encontrar una combinación lineal de las variables, las cuales produzcan las máximas diferencias entre los diferentes grupos de muestras (ALTUNA 2006).

Estas funciones buscan resumir la relación entre grupos de variables, en una sola ecuación, su empleo en el área de la geoquímica es amplio, debido a que permite realizar la clasificación de muestras de origen desconocidos en grupo establecidos previamente (ARIZA, 2006).

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 ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) en cada funciones.

Mediante la representación gráfica (figura 4.3.), se puede observar una separación adecuada entre los grupos A y B usando ambas variables X_1 y X_2 , sin embargo, es posible encontrar una orientación a lo largo de la cual las dos agrupaciones estén más separadas y menos infladas. Las coordenadas de este eje de orientación es lo que constituye las funciones discriminantes (ARIZA, 2006).

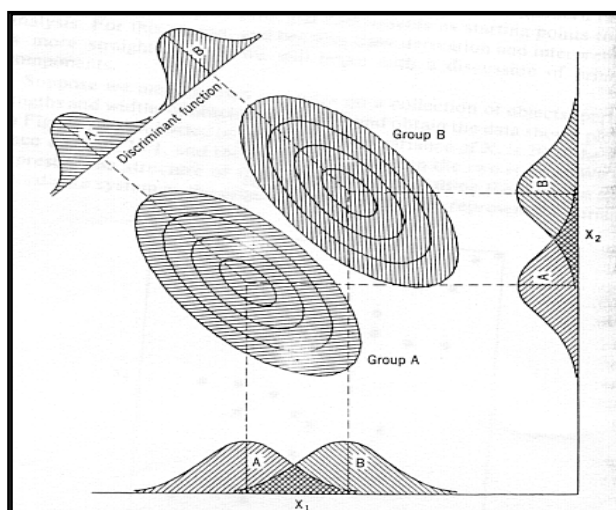


Figura 4.3. Representación de dos distribuciones bivariables mostrando el solape entre los grupos A y B en conjuntos con ambas variables X_1 y X_2 (Tomado de DAVIS 1973)

4.3.2.3. Análisis de agrupación

Mediante este análisis se busca establecer relaciones de cercanía o lejanía de un grupo de datos heterogéneos, de esta forma se agrupan las variables con base en la posible similitud que hay entre ellas. El método empleado para graficar el análisis de agrupaciones, es el dendrograma (figura 4.4.), donde se ordenan de forma jerárquica los datos con ramificaciones combinadas que agrupan los datos dependiendo de las similitudes que haya entre las variables tomadas en cuenta en el análisis. El eje horizontal del dendrograma representa los objetos o individuos y el eje vertical representa el número de grupos formados en cada paso del procedimiento (ARIZA, 2006).

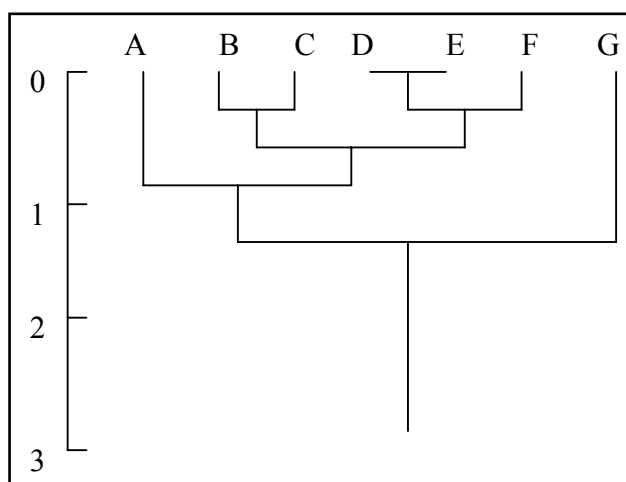


Figura 4.4. Dendrograma (tomado de DAVIS 1973)

4.3.3. Métodos Estadísticos Gráficos

Estos métodos permiten agrupar y discriminar entre valores, para una mejor visualización de los mismos.

4.3.3.1. Diagrama de Barras

Es una representación gráfica mediante el cual el fenómeno que se estudia queda representado por una serie de rectángulos o barras, las cuales pueden dibujarse de forma

tanto horizontal como vertical. El espacio que las separa no debe ser mayor que el espesor de la barra.

El *histograma* es una representación en forma de barras, pero la particularidad que posee es que las barras deben estar una al lado de las otras, sin dejar que haya espacios vacíos que las separen (figura 4.5). Este gráfico se utiliza para representar distribuciones de frecuencias en escala cuantitativa continua (ARIZA, 2006)

A la par del histograma de frecuencias, se puede realizar el *polígono de frecuencia*, el cual es la unión de una serie de puntos que coinciden con la media de cada clase.

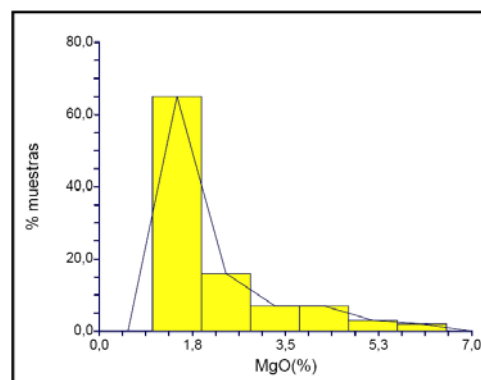


Figura 4.5. Histograma y polígono de frecuencia
(Tomado de BAVUTTI 2006)

4.3.3.2. Tipos de curvas de frecuencia

Existen varios tipos de curvas de frecuencia que se pueden representar en los histogramas. Las cuales pueden ser (ARIZA, 2006):

- o *Las curvas simétricas o bien formadas*, son aquellas que las observaciones que equidistan de máximo central tienen la misma frecuencia.
- o *Las curvas moderadamente asimétricas* son aquellas que muestran un comportamiento sesgados a la cola de la curva a un lado del máximo central es mayor que el otro lado. Donde si la cola mayor se presenta a la derecha de la curva se dice que está sesgada a la derecha o que tiene sesgo positivo, contrario a esto si ocurre el sesgo a la izquierda se dice que es negativo.
- o *Las curvas en forma de J o J invertida*, es aquella donde el máximo se presenta en un extremo.

- o Las curvas en forma de U, es aquellas donde los máximos se encuentran en los extremos.
- o Las curvas bimodal, son aquellas que tienen dos máximos.
- o Las curvas multimodal, tienen más de dos máximos.

4.3.3.3. Perfiles de distribución

Los perfiles de distribución (figura 4.6.) son representaciones gráficas que ayudan a visualizar los valores atípicos de una serie de datos. Las variables se representan en el eje horizontal y los valores de escala en el eje vertical. Los eventos geoquímicos que definen los patrones en los perfiles se reflejarán como máximos, mínimos y deflexiones de las curvas. Donde estos patrones definen a su vez a los marcadores quimioestratigráficos de primero y segundo orden. Estos marcadores quimioestratigráficos de primer orden representan eventos geoquímicos caracterizados por más de un elemento o por una deflexión excepcional de las curvas. Por su parte los marcadores quimioestratigráficos de segundo orden se definen a partir de un solo elemento o por fluctuaciones elementales menos significativas (BAVUTTI, 2006).

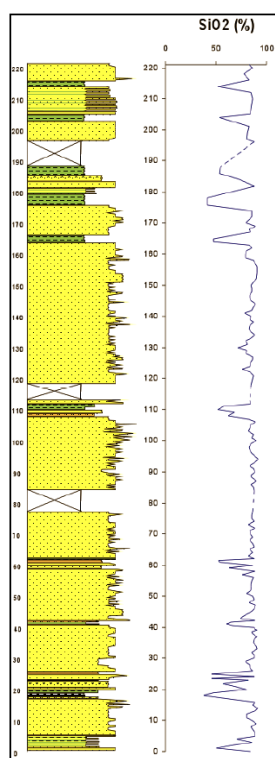


Figura 4.6. Ejemplo de un perfil químico de distribución en el que es posible apreciar la variación de concentración de SiO_2 a lo largo de la sección.

(Tomado de BAVUTTI 2006)

4.4. Quimioestratigrafía

La quimioestratigrafía es la rama de la estratigrafía que se encarga del estudio e interpretación de la composición química representadas en las secciones estratigráficas (VERA, 1994). Se basa en las cualidades químicas de las rocas, se ocupa del estudio e interpretación de la composición química de las rocas sedimentarias mediante las variaciones del contenido de los minerales mayoritarios, minoritarios o traza (MARGOTTA, 2004).

El estudio geoquímica de sedimentos y rocas sedimentarias es la metodología básica de la quimioestratigrafía. Dos limitantes determinan la aplicabilidad de la herramienta, ellas son: el conocimiento de las relaciones bioestratigráficas y el grado de afectación que la diagénesis provoca en la roca (MARGOTTA, 2004)

Por lo tanto, la quimioestratigrafía resulta una herramienta útil proporcionando datos complementarios que se integrarán con los obtenidos por las ramas clásicas de la geológica para deducir la historia geológica de la zona de estudio. (MARGOTTA, 2004)

Los eventos geoquímicos reflejan cambios en los ambientes depositacionales en cuanto a sus características física – químicas, así que los perfiles geoquímicos requieren comparación con la litología, bioestratigrafía y registros estratigráfico de las secciones estudiadas (MARGOTTA, 2004).

Clasificación Geoquímica de HERRON (1988)

HERRON (1988) propone un sistema de clasificación geoquímica para rocas sedimentarias siliciclásticas utilizando las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$, y adicionalmente tomando en cuenta el contenido de Ca. Esta clasificación permite discriminar los tipos de areniscas en: cuarzosas, subarcosas, sublitarenitas, arcosas, litarenitas, grauvacas y areniscas ricas en Fe, según sus proporciones Si, Al y K; mientras que las lutitas las discrimina según su contenido de Fe. De esta forma, se logran obtener

nueve campos de clasificación geoquímica para las rocas. Adicionalmente, según el contenido de Ca se logran separar las muestras en: carbonáticas ($\text{Ca} > 15\%$), calcáreas ($15\% > \text{Ca} > 4\%$) y no calcáreas ($\text{Ca} < 4\%$).

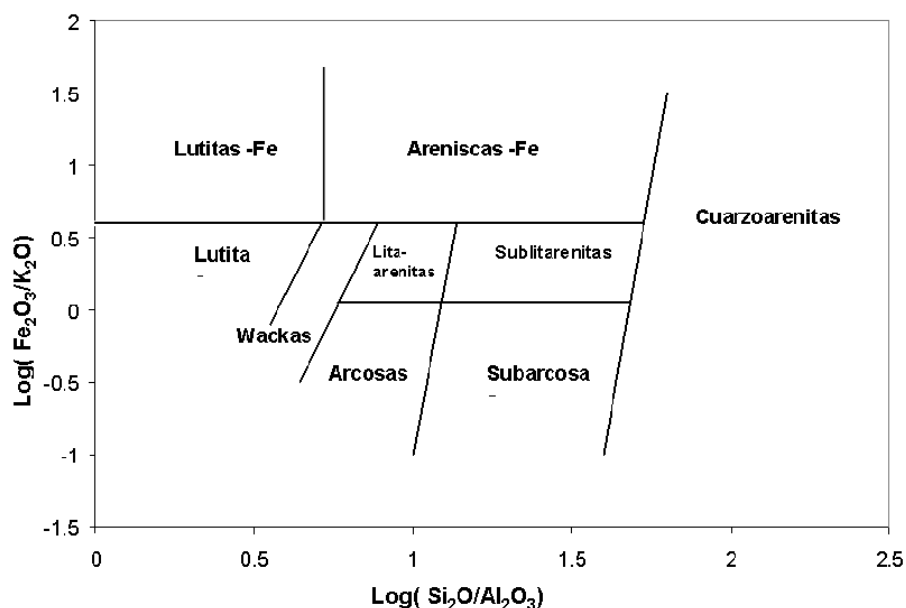


Figura 4.7. Gráfico de clasificación geoquímica de HERRON (1988)

4.5. Tecnología de registro basada en Espectroscopia Elemental

El perfil de espectroscopia elemental es una tecnología de registros desarrollada a comienzos de esta década y probablemente representa la tecnología más nueva que se emplea en la caracterización de pozos. Este registro permite determinar las características químicas de la formación circundante al estimar la proporción en peso de los siguientes elementos: Al, C, Cl, Ca, Fe, Gd, K, Mg, Mn, S, Si, Th, Ti y U. Además, basados en el uso del programa mineralógico se estima la composición litológica y mineralógica de la formación. Las litologías generales que pueden ser determinadas por el programa son: areniscas, lutitas, calcita, evaporitas, carbones y rocas ígneas. Los minerales que puede estimar el programa son: Cuarzo, Feldespatos, Calcita, Carbón, Dolomita, Siderita, Anhidrita, Piritita, Esmeclita/Ilita, Glauconita, Clorita, Caolinita y Hematita. Adicionalmente el programa realiza una asignación del carbono a las litologías que lo tenga en sus

estructuras y el restante carbono que no sea posible ser asignado es generado en una curva, la cual se encuentra relacionada con la presencia de hidrocarburos.

4.5.1. Principios y funcionamiento del perfil de espectroscopía elemental

Esta nueva herramienta de registro mineralógica utiliza una sonda de neutrones pulsantes y el registro espectral de rayos gamma naturales. Un gráfico esquemático de la herramienta se muestra en la figura 4.8 (Modificado de PEMPER ET AL. et al 2006).

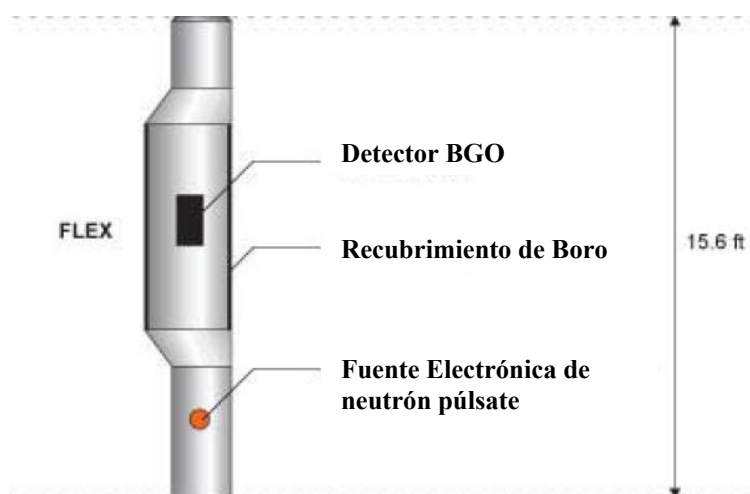


Figura 4.8. Detalle esquemático de la herramienta.
(Modificado de PEMPER ET AL. et al 2006)

El perfil usa un detector y una fuente de aceleración de neutrones capaz de producir neutrones a alta frecuencia, ubicados dentro de una tubería de titanio de alta resistencia. Mientras opera en el ambiente de hoyo abierto en el subsuelo, la fuente electrónica de neutrones pulsante emite neutrones a 14 MeV a la formación. En los primeros 1-2 μsec estos neutrones de rápido movimiento, viajando a velocidades de hasta 115 millones mph, interactúan con los núcleos de los átomos que conforman a la formación, chocando violentamente y dispersándose tanto de forma elástica como inelástica, y finalmente perdiendo su energía. Una parte de los núcleos de esos átomos en los cuales los neutrones interactuaron, se vuelven energéticamente excitados durante el proceso de dispersión inelástica y posteriormente ellos regresan a su estado natural emitiendo uno o más rayos

gamma con un nivel energético característico del átomo padre. Este proceso resulta en la medición del espectro inelástico de energía de rayos gamma, el cual sólo puede ocurrir si la energía de los neutrones incidentes son lo suficientemente fuertes para elevar el núcleo de los átomos padres a niveles energéticos elevados (figura 4.8.) (PEMPER ET AL.ET AL.2006).

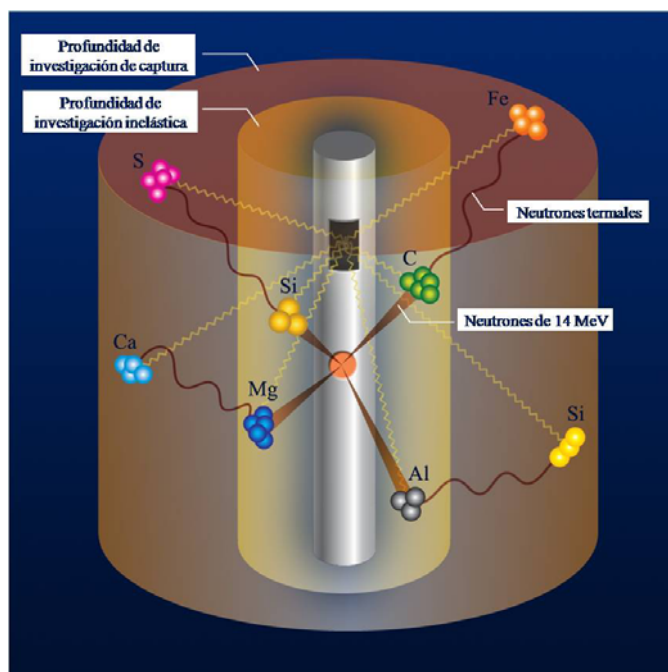


Figura 4.9. Esquema de interacción de los neutrones en la formación (Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Los neutrones emitidos por la fuente continúan su proceso de disminución energética hasta alcanzar el equilibrio termal con el medio que los rodea. Los neutrones de elevado nivel térmico-energético poseen energías cercanas a 0,025 eV y se mantienen en este proceso de difusión por hasta 800 μ sec antes de ser absorbidos por los núcleos de los átomos de la formación, resultando en nuevos isótopos de estos mismos elementos. Luego de la absorción, el núcleo de estos nuevos isótopos liberados transfieren energía por medio de la emisión de uno o más rayos gamma, con una huella característica o nivel energético característico del elemento parental que lo emite, lo cual permite que cada elemento sea identificado (PEMPER ET AL.ET AL.2006).

Este proceso de absorción lleva a la adquisición del espectro de captura. Es conveniente señalar que el espectro de captura y el inelástica para el mismo elemento son

completamente diferentes. Esto permite que dos procesos distintos puedan validar la presencia de elementos, como es el caso del sílice. Las interacciones neutrónicas inelásticas y de captura son mostradas en la figura 4.9. (PEMPER ET AL.ET AL.2006)

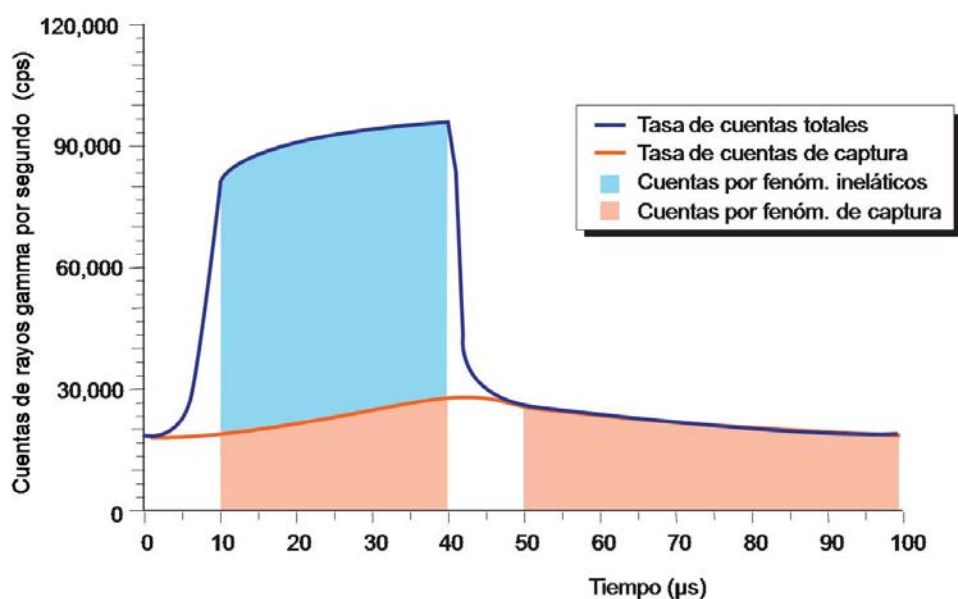


Figura 4.10. Distribución de los espectros energéticos captados por la herramienta en función del tiempo (Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

El modelado de Monte Carlo¹ permite establecer que para las profundidades de investigación de la herramienta en los eventos inelásticos son 8½ pulgadas mientras que para los eventos de captura son 21 pulgada, en el 95% de las interacciones. El volumen de captura es sensitivo a la porosidad, por ejemplo en rocas con 15 % de porosidad la profundidad del espectro de captura alcanza 16½ pulgadas y en el espectro inelástico 7½ pulgadas. El instrumento temporizador interno de la herramienta registra temporalmente cada uno de los espectros como se muestra en la figura 4.10 (PEMPER ET AL.ET AL.2006).

Desde que la fuente emite pulsaciones de neutrones con una frecuencia de 10.000 Hz, el intervalo de tiempo correspondiente a un ciclo individual de registro de los eventos inelásticos y de captura es de 100 μsec, como se muestra en el eje X.

¹ El **método de Monte Carlo** es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y difícil de evaluar con exactitud.

En función del tiempo de interacción de los neutrones, se ha determinado que las energía de rayos gamma registradas durante los primeros 10-40 μsec corresponden con el espectro inelástico. Posteriormente los próximos 50-100 μsec corresponden con la ventana de tiempo que registra el espectro energético de captura (PEMPER ET AL. 2006).

La fuente se apaga en los últimos 50 ciclos en las secuencias de 0,1 segundos cada una, por lo cual el espectro energético de background también se registra. Este espectro de background es usado para remover activaciones o registros de rayos gamma no deseados tanto de los espectros inelásticos y de captura. Este espectro de captura corregido luego es multiplicado por un factor y sustraído del espectro adquirido en la venta inelástica, obteniendo un espectro inelástico libre de la energía de captura. Estos espectros energéticos de captura, inelástica y background son alineados independientemente con respecto a la energía por la localización de picos de energía conocidos, como se muestra en el ejemplo de la figura 4.11 realizado en una zona lutítica rica en minerales de arcilla y feldespatos (PEMPER ET AL. 2006).

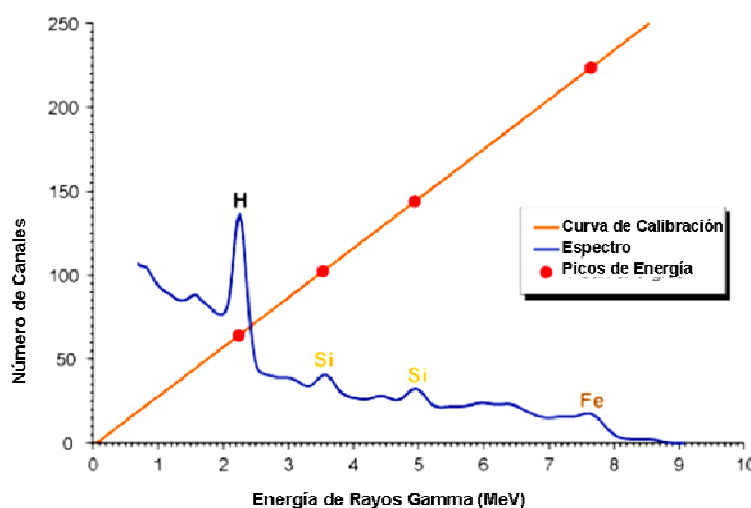


Figura 4.11. Calibración del espectro energético según el número de canales.

Además de los espectros inelásticos y de captura, la sonda también mide la radiación de rayos gamma natural. Este instrumento de espectroscopía natural de rayos gamma contiene un detector de cristal de CsI (Na) de 2 x 12 pulgadas que mide la cantidad de elementos

radioactivos que se desintegran naturalmente en la formación. Con la necesidad de proveer un óptimo conteo de cuentas, la salida de la fuente de neutrones del es ajustada para trabajar en intervalos de tiempo regulares con un control automático en la función de la fuente. Esto se hace con la idea de maximizar la calidad y la validez estadística de la medición. Además, cada espectro energético individual de captura, natural e inelástico, son combinados con aquellos espectros obtenidos en las profundidades cercanas a la medición antes de realizar el análisis del espectro. Este filtro de profundidad se hace coincidir con la respuesta del detector con la finalidad de mejorar la precisión estadística de la medición sin que ocurra pérdida de la resolución en profundidad (PEMPER ET AL.ET AL.2006).

4.5.2. Espectroscopía nuclear de rayos gamma

4.5.2.1. Proporciones elementales:

La espectroscopia de rayos gamma implica análisis físicos y matemáticos para maximizar la información que se extrae de un espectro. Para este caso, se deber conocer si un elemento dado está presente o no en la formación, y en caso afirmativo, en que concentración. Los elementos primarios de interés para este estudio para formaciones terrestres para el perfilaje de pozos se muestran en la tabla 4.1, junto con el tipo de espectro en el cual se pueden identificar (PEMPER ET AL.ET AL.2006).

La presencia de un elemento en un espectro no necesariamente garantiza que una señal clara y diagnóstica pueda ser extraída y luego caracterizada. Por ejemplo, aunque el aluminio está presente en el espectro de captura, su baja sección de captura junto a su poca independencia lineal con respecto al hierro hace muy difícil cuantificar a este elemento. Un problema similar para el magnesio de captura. Ambos elementos, sin embargo, pueden ser caracterizados de mejor forma en el espectro inelástico (PEMPER ET AL.2006).

Tabla 4.1. Elementos químicos que son determinados por cada tipo de espectro.
(Modificado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Elemento	Espectro de Captura	Espectro Inelástico	Espectro Natural
Aluminio	Al	Al	
Calcio	Ca	Ca	
Carbono		C	
Cloro	Cl		
Gadolinio	Gd		
Hidrógeno	H		
Hierro	Fe	Fe	
Magnesio	Mg	Mg	
Manganeso	Mn		
Oxígeno		O	
Potasio	K		K
Silicio	Si	Si	
Sodio	Na		
Azufre	S	S	
Torio			Th
Titanio	Ti	Ti	
Uranio			U

Los espectros de captura e inelástico de varias litologías son mostrados en las figuras 4.12 y 4.13, donde los picos de energía primarios de varios elementos son señalados. Algunas observaciones del análisis de estos espectros muestran que los picos de energía del Ca y C presentan una señal clara para los espectros elástico e inelástico, por su parte el Si muestra una señal clara y diagnóstica en areniscas. El Ca, Mg y C pueden ser observados en la dolomita, y las señales de Ca y S se pueden distinguir en la anhidrita. Tanto el Fe y el Al muestran señales leves en litologías lutíticas debido a la presencia de minerales de arcillas y feldespatos. En general, estos espectros de energía proveen una forma visual distintiva debido a las características físicas del espectro las cuales son reafirmadas y explotadas en los análisis matemáticos de la espectroscopía de rayos gamma (PEMPER ET AL.2006).

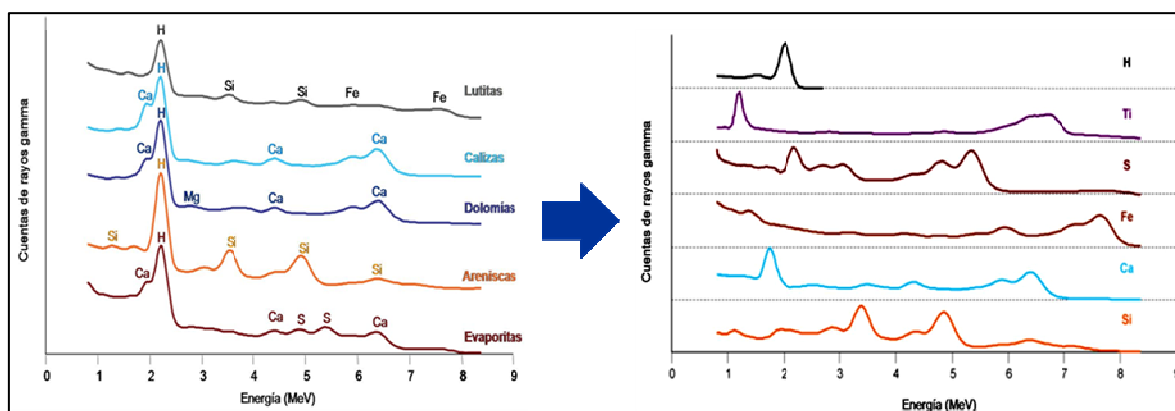


Figura 4.12. Espectro de captura para 5 litologías básicas

Figura 4.13. Espectro inelástico para 5 litologías básicas
(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

La clave para la identificación apropiada de los elementos en los espectros inelástico, natural y de captura son mostrados en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16. Estos gráficos muestran el espectro energético estándar o “fingerprints” de los núcleos de los elementos más importantes mostrados en la tabla 4.1 (PEMPER ET AL.2006).

Cada uno de estos estándares fueron determinados colocando la herramienta en formaciones de composición química previamente conocida. Los estándares de Si y Ca, por ejemplo, fueron construidos de datos obtenidos cuando la herramienta se corrió en formaciones compuestas de areniscas limpias (SiO_2) y calizas (CaCO_3), respectivamente (PEMPER ET AL.2006).

Los estándares de Hidrógeno, Oxígeno y Carbono fueron obtenidos del espectro adquirido cuando la herramienta se corrió en tanques con agua (H_2O) y petróleo (C_nH_m). El estándar del magnesio fue creado colocando bloques de magnesio alrededor de la herramienta en los mismos tanques de agua y petróleo. En general, cada uno de estos estándares requieren de datos que maximicen la cantidad de elementos específicos que son caracterizados (PEMPER ET AL.2006).

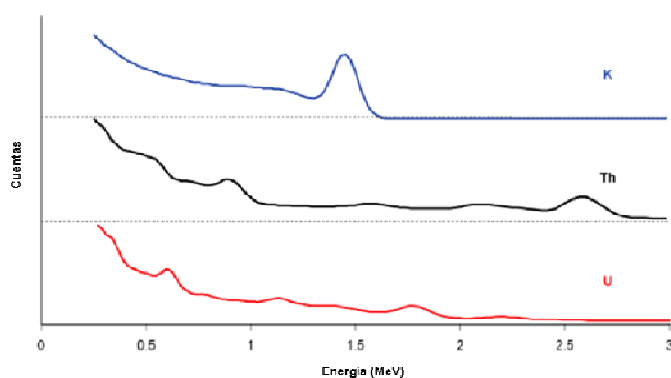


Figura 4.14. Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro natural.

(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

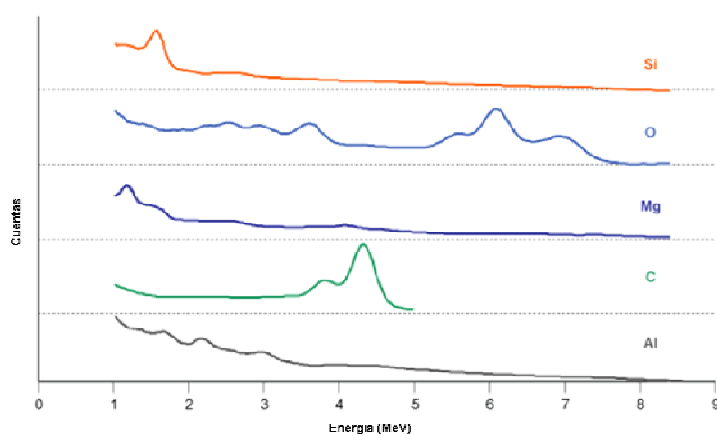


Figura 4.15. Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro de captura.

(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

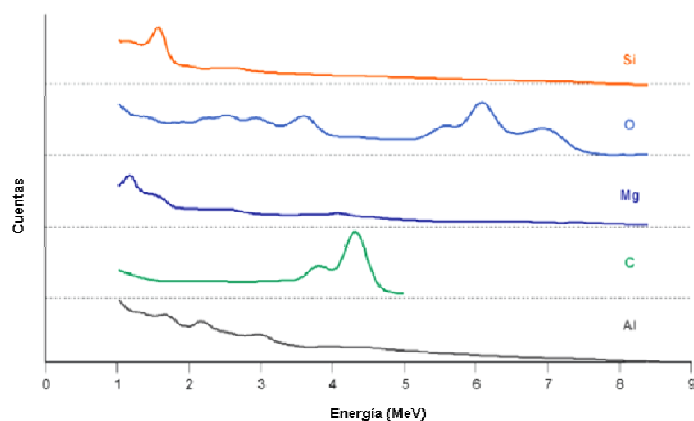


Figura 4.16. Estándares energéticos para los elementos captados en el espectro inelástico.

(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Las ganancias en las cuentas de los rayos gamma provenientes de los elementos son calculados para cada punto medido dentro del hoyo mediante la medición del espectro y la

determinando la combinación de los estándares por medio de las cuales el espectro medido puede ser mejor representado. Esta metodología general es referida como una deconvolución del espectro e implica un proceso de inversión matricial. Todo este proceso se basa en la asunción de que cada espectro medido está compuesto de una combinación lineal de los espectros individuales de cada uno de los elementos que están alrededor de la herramienta. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma (PEMPER ET AL.2006):

$$\mathbf{d}_i = y_1 \mathbf{s}_{i1} + y_2 \mathbf{s}_{i2} + y_3 \mathbf{s}_{i3} + \dots + y_m \mathbf{s}_{im} + \varepsilon_i \quad (1) = y_j \mathbf{s}_{ij} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Donde:

$\mathbf{d}_i$ = espectro medido

y_j = ganancia de los elementos medidos

$\mathbf{s}_{ij}$ = estándar elemental para el cada elemento j

ε_i = Ajuste del espectro (incertidumbre)

$i = 1, 2, 3, \dots, n$; n = números de canales de datos

$j = 1, 2, 3, \dots, m$; m = números de elementos

En este sistema, los datos del espectro $\mathbf{d}_i$ son medidos por la herramienta mientras que los estándares $\mathbf{s}_{ij}$ son los determinados en el laboratorio. El objetivo es resolver esta ecuación con el mejor ajuste y la mejor combinación de ganancias elementales que minimicen la incertidumbre del ajuste del espectro ε_i , donde el espeso de cada uno de los canales contribuye de igual forma para la construcción del espectro. La solución final es mostrada en la siguiente expresión:

$$\mathbf{y} = [(\mathbf{S}^T \mathbf{W} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{W}] \mathbf{d} \quad (3) = \mathbf{E} \mathbf{d} \quad (4)$$

Donde:

$\mathbf{y}$ = Ganancia de la matriz ($m \times 1$)

$\mathbf{S}$ = Matriz espectral compuesta de los estándares $\mathbf{s}_{ij}$ ($n \times m$)

$\mathbf{W}$ = Matriz de la composición en peso ($n \times n$)

$\mathbf{d}$ = Matriz de los datos o espectro medido ($n \times 1$)

$\mathbf{E}$ = Matriz de estimación ($m \times n$)

La matriz de estimación es llamada de esta forma desde que los productos de cada fila **d** una mejor estimación para los campos de los elementos. Este método de análisis espectral es usado para los datos provenientes tanto por el sistema de espectroscopía elemental como por el de rayos gamma natural (PEMPER ET AL.2006).

Debido al largo número de elementos en los espectros inelástico y de captura, procesos de interacción especiales también se efectúan en este proceso. Luego que las ganancias son calculadas, la matriz de estimación es recalculada usando sólo aquellos estándares en los cuales las ganancias son muchos mayores que cero. El proceso se considera completo sólo cuando todos los campos elementales son positivos. Mayores detalles sobre este proceso pueden ser consultados en: PEMPER ET AL.*et. al.* (1988), HOEL *et. al.* (1971) y DRAPER & SMITH (1966) (PEMPER ET AL.2006).

4.5.2.2. Concentraciones de la formación:

Una vez que las ganancia de rayos gamma son obtenidos, el paso final en el proceso de espectroscopía es el de convertir esas ganancias en concentraciones elementales (PEMPER ET AL.2006).

Antes se debe considerar que las concentraciones de rayos gamma naturales de los elementos K, Th y U, están debidamente calibradas con los estándares API. Debido a que estas mediciones son críticas para una evaluación precisa de la litología y mineralogía, esta calibración fue verificada nuevamente realizando mediciones de formaciones en el Baker Atlas Instrument Characterization Center (ICC) ubicado en Houston, Texas, USA (PEMPER ET AL.2006).

Los resultados de este estudio se muestran en la tabla 4.2, donde destacan el excelente grado de correspondencia entre los valores medidos por la herramienta y los determinados en el laboratorio a través de análisis de núcleos (PEMPER ET AL.2006).

Tabla 4.2. Comparación de los valores obtenidos por la herramienta y análisis de núcleos en diferentes tipos de formaciones. (Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Formaciones	Gamma Ray (API)	$\bar{K}$ núcleo %	$\bar{K}$ medido % C	$\bar{U}$ núcleo ppm	$\bar{U}$ medido ; ppm	$\bar{T}h$ núcleo ppm	$\bar{T}h$ medido ppm
Calcita	9	0.04	0.11	0.06	0.10	0.1	3.4
Cuarzo	13	0.03	0.07	0.46	0.52	1.6	2.9
Dolomita	28	1.08	1.03	1.07	0.92	1.3	1.1
Arenas 1 Berea	39	0.86	0.68	1.75	1.83	5.7	4.4
Sierra White (Ígneas)	53	1.87	1.86	1.10	1.27	3.6	3.6
Arenas 2 Berea	59	2.95	2.72	0.62	0.93	3.0	2.5
Charcoal Black (Ígneas)	183	3.41	3.49	7.92	9.43	18.7	17.6

Las ganancias obtenidos desde los espectros de rayos gamma del campo inelástico y de captura fueron calibrados mediante las medidas que fueron determinadas usando las formaciones patrón. Este proceso de calibración está continuamente en desarrollo a medida que mayores datos de núcleos de pozos se estudian y se comparan con los resultados de la herramienta (PEMPER ET AL.2006).

En general, la calibración de estas ganancias dependen las “cross-sections” de los neutrones de los elementos, la densidad de la formación, el poder de la fuente de neutrones, la eficiencia del detector, el rango de energía seleccionado y en algunos casos hasta de la litología específica. Todos estos efectos se representan en los algoritmos empíricos finales que usan para la transformación de las ganancias de rayos gamma en concentración elementales (PEMPER ET AL.2006).

Desde que los rayos gamma inelásticos se generan en la interacción de los neutrones de alta energía con los núcleos de los elementos de la formación, la cantidad o proporción de estos elementos junto con su sección de captura representan los parámetros más importantes que se consideran en este proceso. Con una buena aproximación y un grado de error bajo, los autores encontraron que la relación que existe entre la concentración elemental en peso y la ganancia inelástica es lineal. Esto se demuestra en la figura 4.17,

donde las ganancias del Si inelástico son graficadas versus los valores obtenidos de análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para una misma formación (PEMPER ET AL.2006).

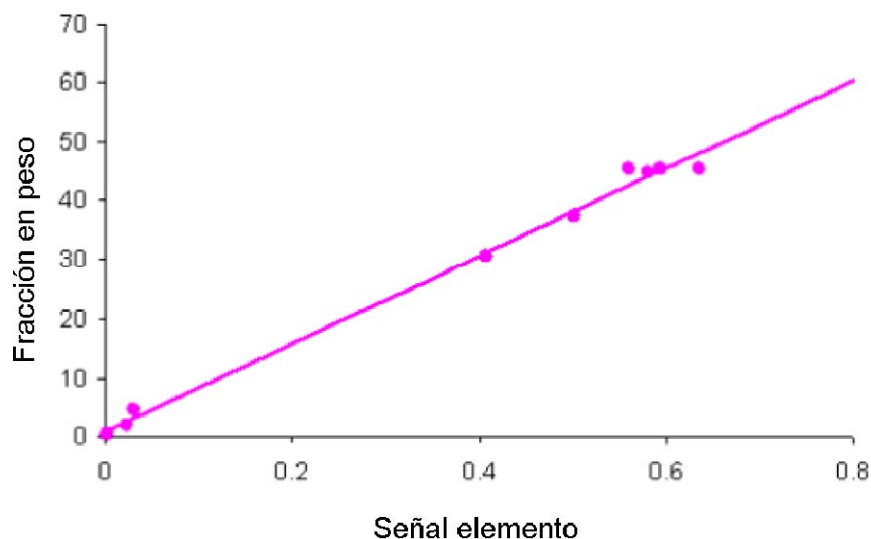


Figura 4.17. Relación lineal entre la ganancia elemental y la fracción en peso del elemento Silicio.
(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Respecto a la funciones de transformación del espectro de captura para estimar concentraciones elementales, se han encontrado que estos fenómenos son mucho más dependientes de los factores ambientales; y por lo tanto, la relaciones son mucho más complejas que para convertir el espectro inelástico (PEMPER ET AL. 2006).

Una muestra de la comparación hecha entre las concentraciones elementales obtenidas de la medición del registro y valores determinados del análisis de núcleos en laboratorios de FRX se muestra en la tabla 4.3 donde se observa la congruencia de ambos resultados para una litología de areniscas feldespáticas (PEMPER ET AL. 2006).

Tabla 4.3. Comparación de los valores obtenidos por la herramienta y los análisis de núcleos en diferentes tipos de formaciones. (Modificado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Elemento	Estudio de Núcleo por PPE	Valores del registro FLEX/SLII
Aluminio	3,7%	3.4 %
Calcio	5.7 %	7.0 %
Hierro	0.6 %	0.7 %
Magnesio	1.8 %	2.4 %
Potasio	1.9 %	1.9 %
Sílice	29.9 %	29.4 %
Azufre	2.5 %	3.0%

4.5.2.3. Litología y Mineralogía

Las concentraciones elementales obtenidas por espectroscopía nuclear mediante el principio de la herramienta descrita en este trabajo provee la oportunidad de cuantificar la mineralogía de las rocas de la formación usando algoritmos de transformación de concentraciones de elementos a minerales. Muchos de los métodos utilizados en el pasado han generado múltiples soluciones para el mismo sistema de ecuaciones, obteniéndose sistemas indeterminados (LOFTS, 1993 en PEMPER ET AL.2006).

Considerando estas limitaciones, se proponen un nuevo sistema de clasificación. Este sistema comienza con una aproximación de la litología general, seguida de una determinación más detallada de la litología específica, finalmente llevan a la determinación del contenido mineralógico de la formación. El propósito del paso intermedio de determinar litologías más específicas es para proveer la oportunidad de identificar y colocar limitantes en la siguiente etapa de evaluación mineral de la roca (PEMPER ET AL.2006).

Si la litología de la formación puede establecerse en base a su composición química, entonces la composición mineral probable de la matriz de la roca puede ser determinada más fácilmente. Diagramas ternarios que poseen relaciones de óxidos mayoritarios basados en análisis geoquímicos de roca total, han sido utilizados efectivamente en el pasado para definir distintos tipos de litología. El sistema mineralógico es un sistema de clasificación,

propiedad de Baker Atlas, que usa métodos análogos y criterios de discriminación análogos a los diagramas ternarios, para estimar las proporciones mineralógicas de la roca medida por la herramienta.

El desarrollo de este sistema está basado en 334 análisis geoquímicos y estimación mineralógica de núcleos de 58 formaciones distintas perforadas en 405 pozos distintos donde fue utilizada la herramienta de espectroscopía elemental (PEMPER ET AL.2006).

Los algoritmos desarrollados para categorizar la litología general incorporan variaciones de la composición de óxidos (figura 4.18). Para este caso en particular, los óxidos considerados son CaO, MgO, y SiO₂. Diagramas ternarios adicionales utilizan el CaO, S y Fe₂O₃ para completar el proceso de discriminación de litologías generales, obteniéndose 6 grandes grupos: areniscas, lutitas, carbón, carbonatos y evaporitas (PEMPER ET AL.2006).

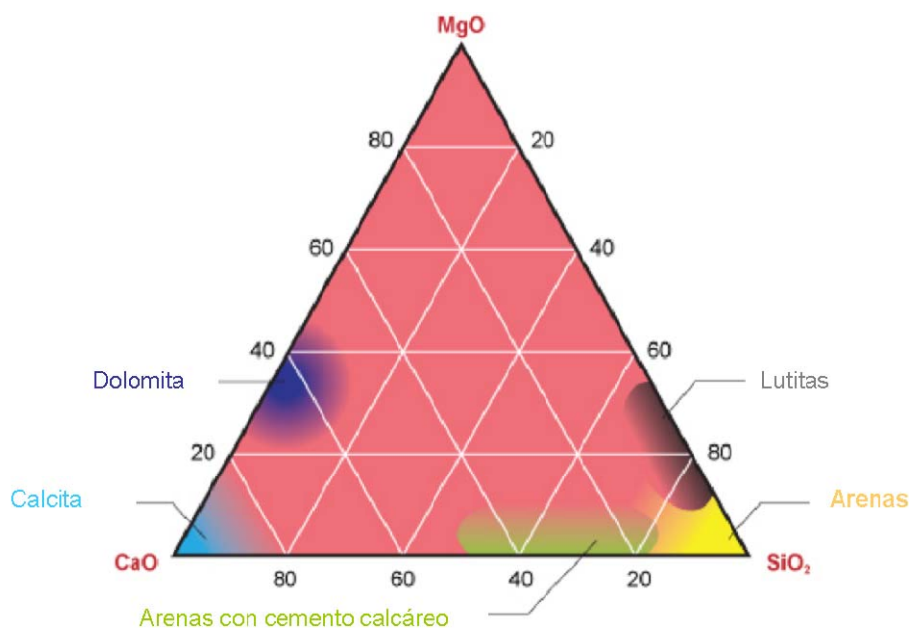


Figura 4.18. Diagrama ternario para clasificación de litologías generales.
(Modificado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

Diagramas ternarios adicionales se emplean posteriormente para categorizar litologías específicas. Los óxidos involucrados en este segundo paso incluyen los siguientes grupos: (K₂O, Fe₂O₃, SiO₂), (K₂O, MgO, SiO₂), y (Fe₂O₃, S, and CaO). La categoría general de arenas, por ejemplo, es subdividida en categorías específicas: cuarzosa, feldespática o

arcosa, lítica, lutítica, limosa, limosa feldespática, limosa lítica y limosa-lutítica. La clasificación de arenisca feldespática es definida como la roca arenisca cuarzosa que contenga una fracción de feldespatos y una fracción menor de granos líticos, como por ejemplo se muestra en la figura 4.19. Las últimas cuatro litologías específicas corresponden con arenas que contienen, al menos, 10% de carbonatos (PEMPER ET AL.2006).

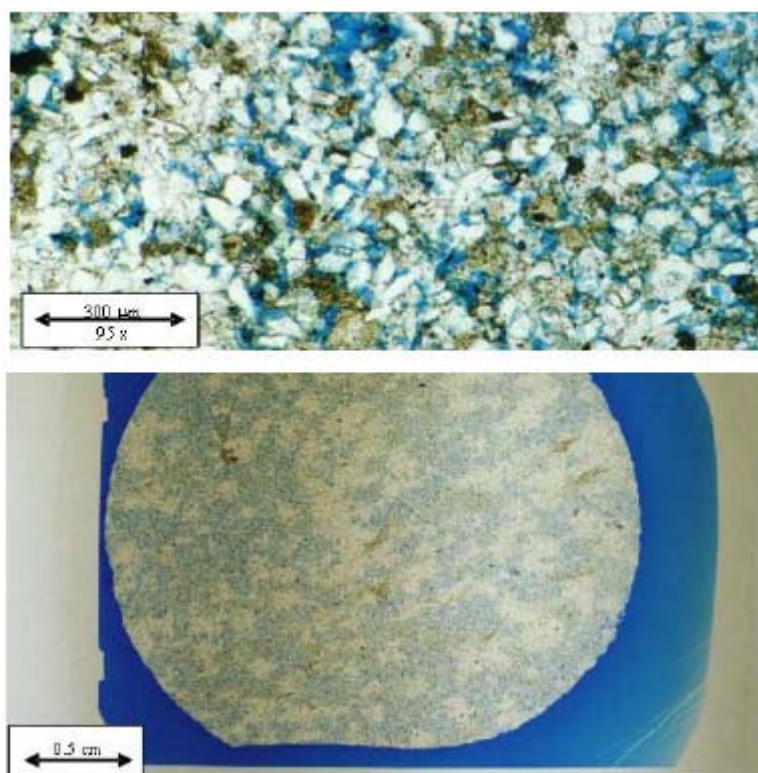


Figura 4.19. Fotografía de la sección petrográfica de la arenisca feldespática evaluada.
(Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

El paso final en el proceso de interpretación es derivar la mineralogía a partir de la litología específica. Las clasificaciones usadas en este método para hallar la litología específica le permiten al analista o intérprete del registro establecer parámetros o límites para la solución litología y mineralógica final. Por ejemplo, en el caso de una arcosa, se debe esperar la presencia de arcillas tipo ilita/esmectita, clorita y caolinita en base a los modelos de descomposición que tienen los feldespatos. De manera similar, se puede predecir que una dolomita - calcítica está compuesta mayoritariamente de dolomita con una fracción menor de calcita y posiblemente anhidrita (PEMPER ET AL.2006).

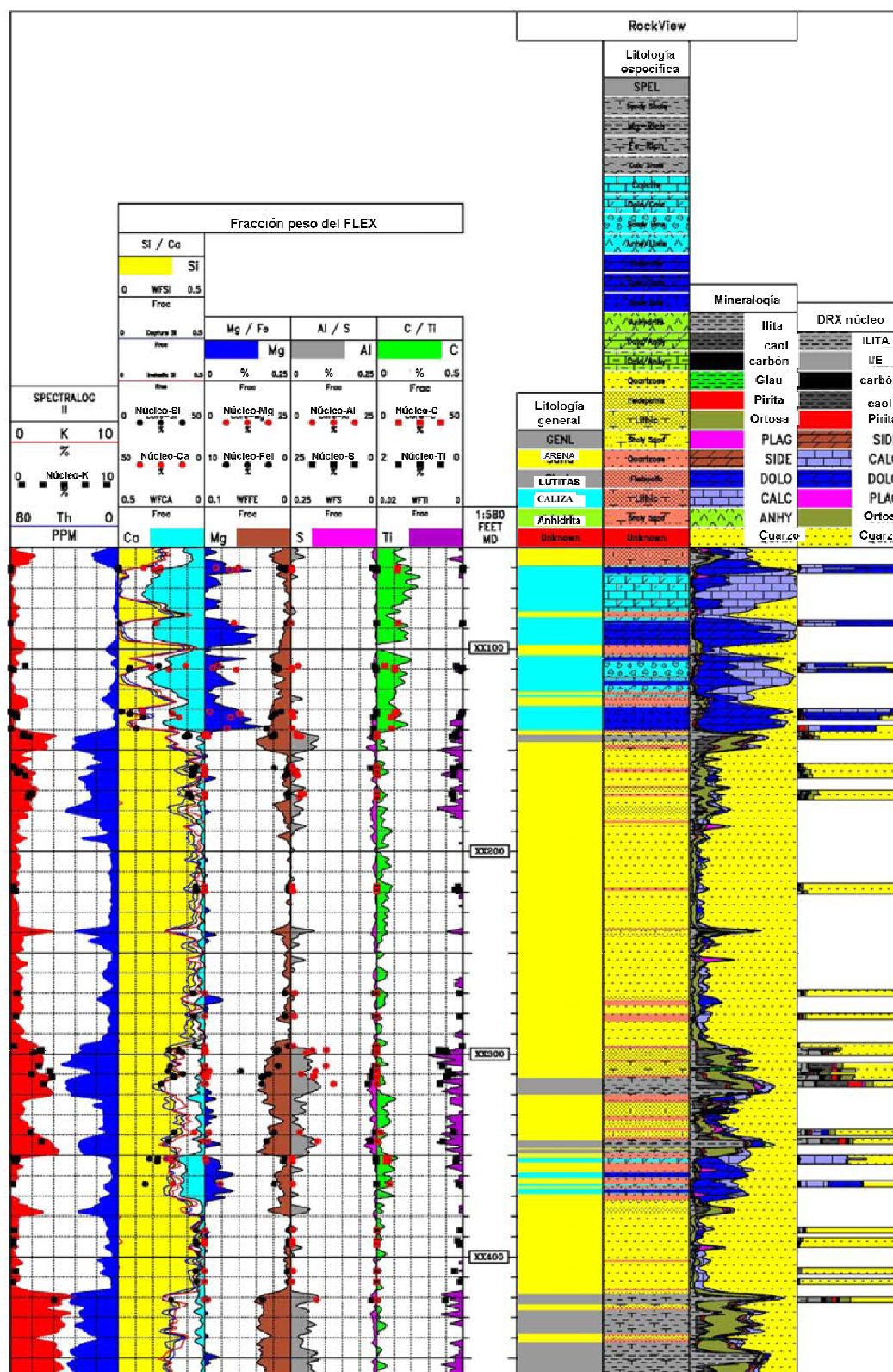


Figura 4.20. Ejemplo del registro de espectroscopía elemental en un pozo de Suramérica. (Tomado de PEMPER ET AL.et. al. 2006)

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1. Generalidades:

Mediante la herramienta de espectroscopía elemental de perfilaje de pozos se tomaron 504 mediciones de la proporción de Si, Al, K, Fe, Mn, Ti, Ca Mg, S, Th, U y Gd con una frecuencia de muestreo constante de 4', de las cuales 123 mediciones se tomaron en el pozo A, 126 en el pozo B, 129 en el pozo C y 126 en el pozo D; adicionalmente se obtuvieron 81 muestras de núcleo que fueron procesadas mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) pertenecientes al pozo A. Estos resultados se presentan en los Anexos N° 1.

Es importante mencionar el efecto del lodo de perforación en los datos suministrados por la herramienta de espectroscopía elemental, debido a que se encuentra presente a lo largo de todos los pozos mientras se perfilaba. Los datos suministrados por la empresa Baker Hughes respecto al lodo de perforación empleado señalan que es base agua tipo bentonita que se mantuvo constante a largo de los cuatro pozos. Por lo cual la contaminación de los resultados obtenidos es el mismo, afectando principalmente a los elementos Ca, Mg, S y C. Durante el procesamiento de los datos se aplica una corrección por efectos ambientales para eliminar esta influencia.

5.2. Validación de las mediciones químicas realizadas por la herramienta de espectroscopía elemental:

Para realizar estudios de caracterización química se debe contar con información confiable de las formaciones en estudio, por ello se hizo necesario efectuar análisis químicos de al menos uno de los pozos estudiados en este trabajo. Para ello se seleccionó el pozo A, el cual contaba con muestras de núcleo y una caracterización sedimentaria previa. Del pozo A se tomaron 81 muestras de núcleos tomadas cada 4' (1,2 m) de separación de la sección menos contaminada por lodos de perforación, las cuales fueron preparadas y

analizadas por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) obteniéndose información en porcentaje en peso de siete óxidos mayoritarios como son SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_{3T} , MnO , CaO y K_2O y adicionalmente el elemento V en ppm (Anexos N° 2). Debido a que más del 50% de las muestras se encontraban impregnadas de hidrocarburos, las mediciones del elemento V se afectaron y por lo tanto, sus valores no corresponden sólo a características de la formación.

Después de cambiar los óxidos a su porcentaje del elemento correspondiente, se procedió a comparar con las mediciones obtenidas por el perfil de espectroscopía elemental (Anexos N° 2). Para lograr esta validación se planteó la realización de diferentes análisis estadísticos como perfiles verticales de la variación del elemento en profundidad, perfiles de frecuencia acumulada por elementos y gráficos de relación entre elementos iguales. Dichos análisis mostraron una buena correlación entre las mediciones de la FRX y los de la herramienta de espectroscopía elemental exhibiendo iguales tendencias e inflexiones para ambas mediciones, como se puede observar en las figuras 5.1 hasta la figura 5.6

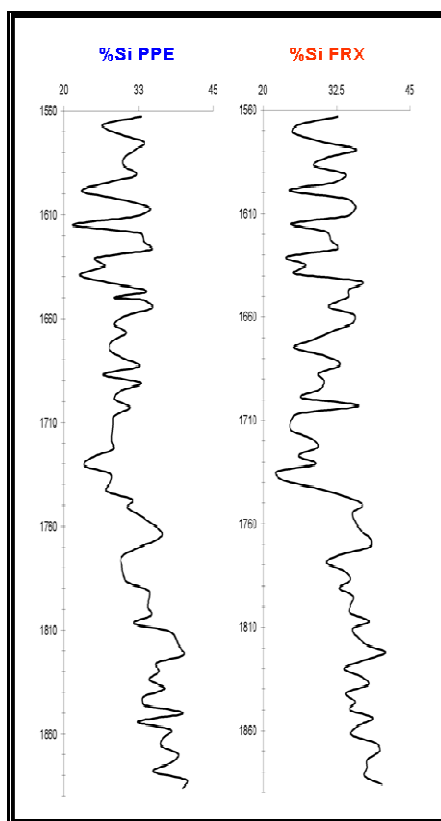


Figura 5.1. Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para el elemento Si

Durante este proceso de validación de las mediciones geoquímicas es conveniente comentar que no se efectuó una comparación de forma directa “punto a punto” entre los valores químicos medidos en el laboratorio para las muestras de los núcleos y los medidos por el perfil de espectroscopía elemental para una misma profundidad; ya que la filosofía de medición del perfil de espectroscopía elemental, como se comentó en la sección 4.5 del capítulo IV, no se refiere a la medición de la concentración química para un valor de profundidad particular, sino que este perfil estima la composición química en un “volumen” de formación donde ocurren las interacciones neutrónicas (figura 4.8), cuyo espesor vertical promedia 1 pie (40 cm) aproximadamente.

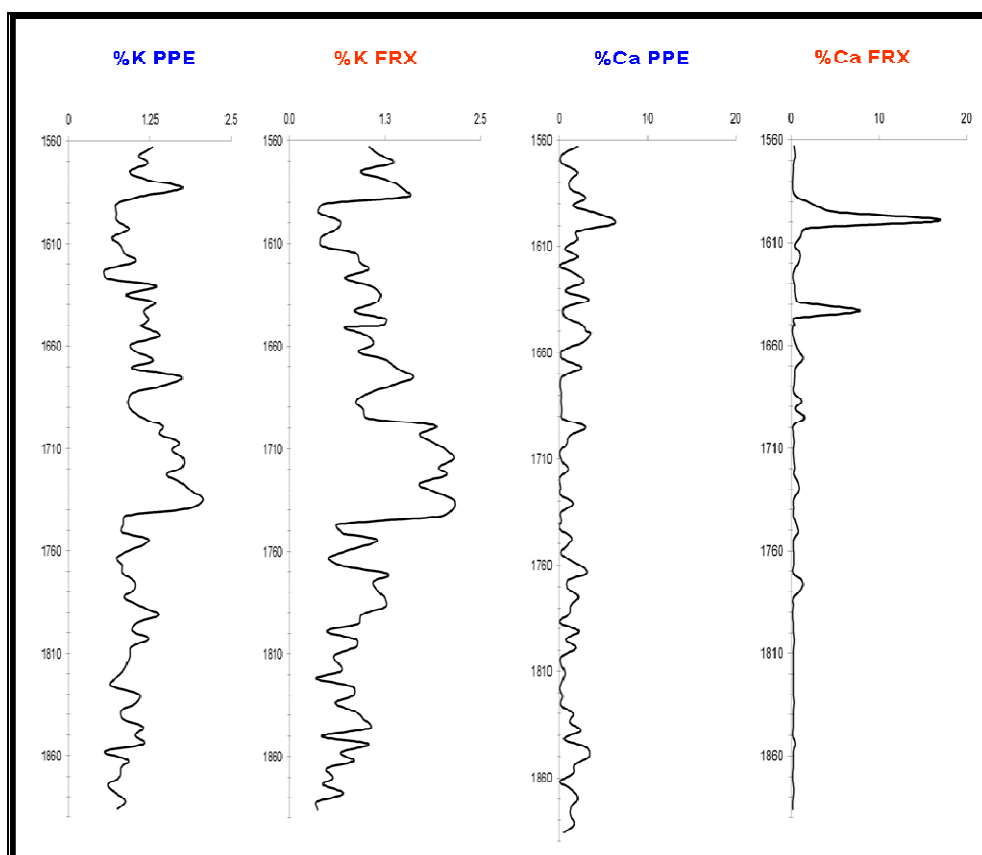


Figura 5.2. Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PPE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos K y Ca

Por lo tanto, comparar valores químicos de muestras puntuales con valores obtenidos en “volúmenes” de formación frecuentemente ocasionó que no se obtuviera una correlación del 100% entre los valores químicos medidos, especialmente para aquellos intervalos donde ocurrían intercalaciones de facies sedimentarias de espesores delgados ($\leq 3'$); puesto que

en estas situaciones, la composición química de la muestra obtenida posiblemente correspondía con un horizonte litológico particular que no necesariamente era el más representativo de la composición química mayoritaria del intervalo en medición.

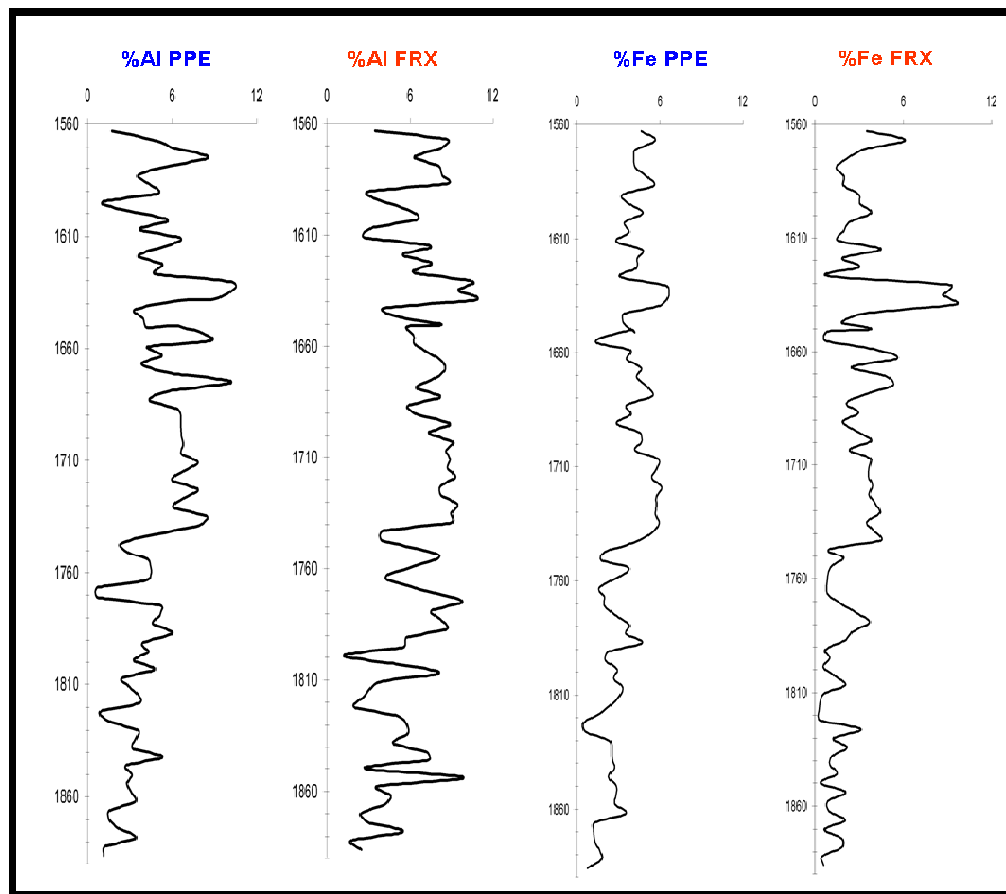


Figura 5.3. Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos Al y Fe

En efecto, según Dugarte (2008), la base de la Formación Oficina estudiada en este trabajo, está compuesta por importantes espesores de secuencias heterolíticas e intercalaciones delgadas entre horizontes lutíticos y arenosos, pertenecientes a secuencias de bahías interdistributarias y llanuras de mareas. En estos casos, por ejemplo, los valores químicos obtenidos para una muestra de núcleo tomada dentro de una sección heterolítica frecuentemente arrojaron una composición química poco representativa de toda la secuencia puesto que dependía de la proporción arena/arcilla presente en la muestra en particular, mientras que el perfil de espectroscopía elemental medía la composición química de todo un “volumen” de secuencia heterolítica.

De esta forma, considerando todos estos comentarios y con la finalidad de comprobar la validez en las mediciones, se procedió a elaborar perfiles verticales de frecuencia acumulada con el propósito de evaluar las pendientes y verificar que “puntos de quiebre” asociados a aumentos y disminuciones significativos en la concentración de los elementos hayan sido detectados por ambas mediciones, tanto la FRX como el perfil de espectroscopía elemental.

Los resultados mostrados de esta comparación de los perfiles de frecuencia acumulada permitieron reconocer que la tecnología de espectroscopía elemental reconoció la totalidad de los cambios (“puntos de quiebre”) en la composición química definidos por los valores de FRX y adicionalmente, ambas pendientes tuvieron un comportamiento similar. De esta forma, se comprobó que existió un ajuste general bastante aceptable entre los valores químicos obtenidos en el laboratorio y los valores medidos en la secuencia estudiada por la tecnología de espectroscopía elemental (anexos N° 2).

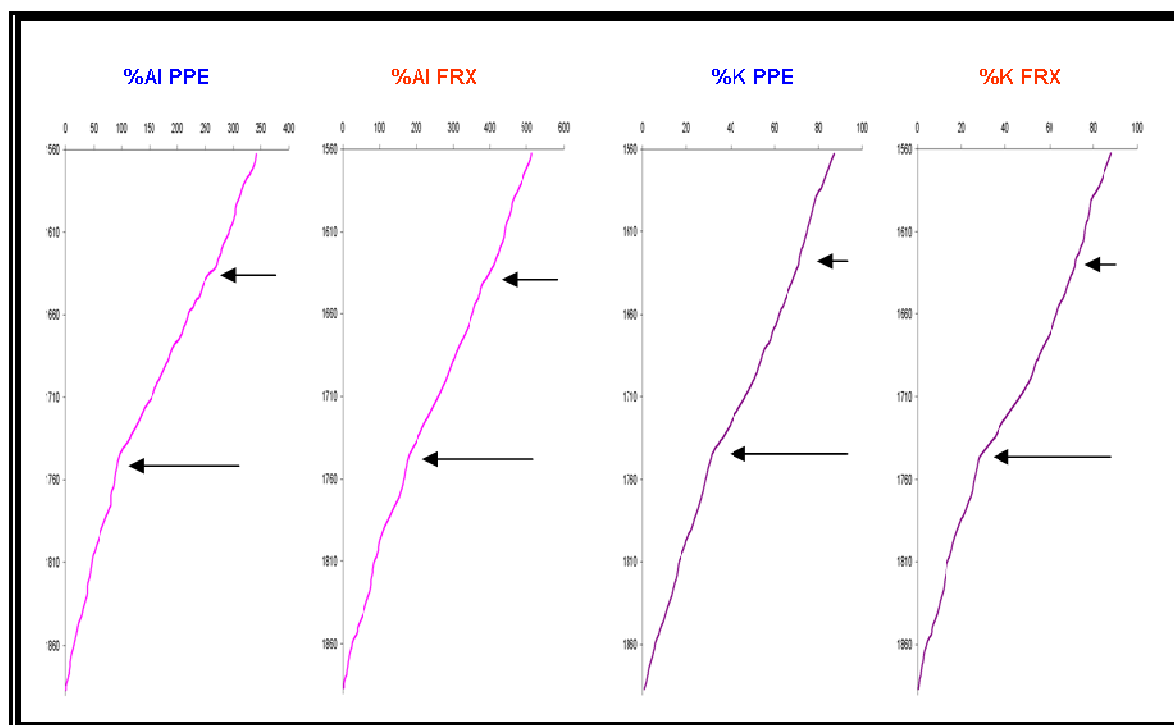


Figura 5.4. Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos Al y K. Las flechas negras muestran quiebres de importancia observados en ambas curvas

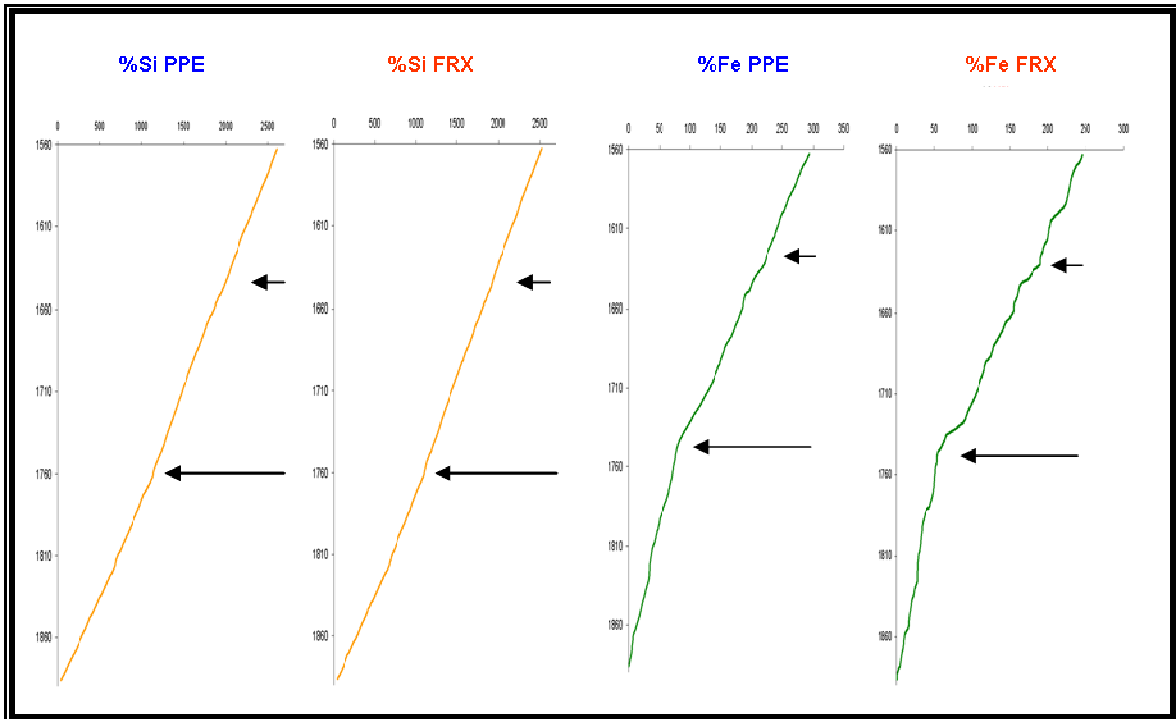


Figura 5.5. Comparación entre los resultados obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PEE) y la fluorescencia de rayos X (FRX) para los elementos Si y Fe. Las flechas negras muestran quiebres de importancia observados en ambas curvas

Con la finalidad de mejorar las tendencias de las mediciones y ajustar la dispersión en aquellos lugares puntuales donde no se observó una completa correspondencia entre los valores medidos por ambas técnicas, URBANI (2008) en conversaciones personales, sugirió la elaboración de un procedimiento de ajuste que permitiera una mayor aproximación entre las tendencias generales. Este procedimiento consiste en realizar un gráfico a la misma escala cuyos ejes son los porcentajes obtenidos de la FRX y la herramienta de perfilaje para un mismo elemento y generar una recta con una pendiente unitaria de 45° que represente la igualdad de medición entre ambas fuentes de medición. Posteriormente se grafica los valores medidos por FRX y el perfil con su tendencia real y se busca el punto de intersección con la recta previamente trazada. Luego, las mediciones obtenidas por el perfil que se encuentren por debajo de la línea de tendencia ideal se les deben sumar un valor constante y las mediciones que se encuentren por encima se les debe restar otro valor constante (figura 5.6). Por ejemplo, el ajuste propuesto para el elemento Si consiste en sumar 2% para aquellos valores menores a 35% y sumar 0% en los mayores.

Un procedimiento de ajuste similar pudiera elaborarse para cada elemento pero no se produjo ningún algoritmo numérico que e estos ajustes debido a la complejidad matemática de los mismos y tampoco fue uno de los objetivos propuesto en este trabajo. Aparte, el resultado más importante obtenido de la comparación y evaluación de los resultados entre ambas técnicas de medición es que las mediciones hechas por el perfil de espectroscopía elemental mantienen perfectamente las tendencias reales y respetan los cambios en las concentraciones elementales dentro de la secuencia estudiada. Por lo tanto, se comprobó la validez de sus mediciones y se procedió a realizar la caracterización química de la secuencia.

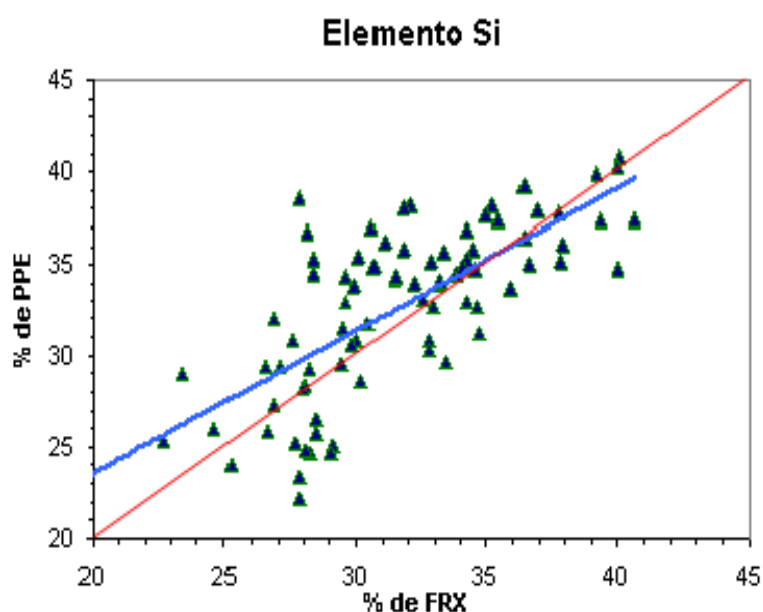


Figura 5.6. Representación esquemática de la relación entre los valores obtenidos por el perfil de espectroscopía elemental (PPE) y los obtenidos por FRX para el elemento Si. El grafico se muestra la línea roja que representa la tendencia ideal que deben poseer los valores y la línea azul representa la tendencia que poseen

Finalmente es importante mencionar que las mediciones realizadas por el perfil de espectroscopía elemental para el elemento Ca se encontraron considerablemente afectadas por el lodo de perforación. Así mismo se debe señalar que para este tipo de formaciones siliciclásticas donde la proporción de los elementos Ti y Mn son menores al 0,1%, se hace difícil una correcta captación de mediciones reales por la herramienta de espectroscopía elemental debido a que estos valores se encuentran dentro del margen de error de medición obtenida por este perfil.

5.3. Clasificación geoquímica según HERRON (1988)

Debido a que el muestreo se realizó mediante la herramienta de espectroscopía elemental, efectuado de manera constante en hoyo abierto donde no es posible el control visual del muestreo, se plantea la necesidad de conocer el tipo de roca sedimentaria según los datos químicos. Mediante la clasificación de las rocas sedimentarias establecidas por HERRON (1988) la cual se basa en datos químicos, se permite establecer distintos tipos de areniscas y lutitas, empleando los logaritmos de las relaciones de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ y las concentraciones Ca. Para este trabajo de investigación los logaritmos se debieron cambiar ya que la herramienta de perfilaje utilizada suministra los datos de forma elemental y no como óxidos (Si/Al y Fe/K). La clasificación para cada muestra se observa en los Anexos N° 3 hasta el N° 4 y en los siguientes gráficos se muestra el esquema de HERRON (1988).

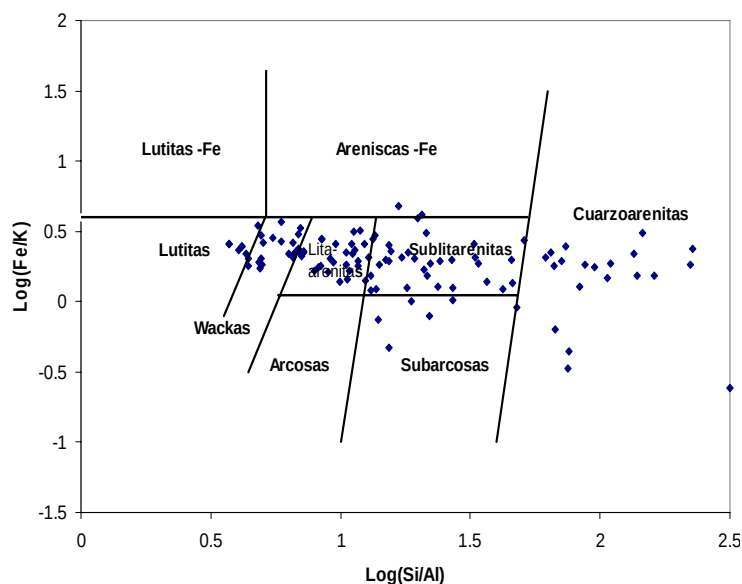


Figura 5.7. Ubicación de las muestras del pozo A en el esquema de clasificación de HERRON (1988)

La figura 5.7 muestra para el pozo A los resultados de la clasificación de HERRON (1988), estableciendo que la mayoría de las muestras se encuentran entre las litologías lutitas, wackas, litarenitas, sublitarenita subarcosas y cuarzoarenitas. Tres de las muestras

entran al campo de las areniscas-Fe. El tipo de litologías correspondiente a cada muestra se observa en el Anexo N° 2.

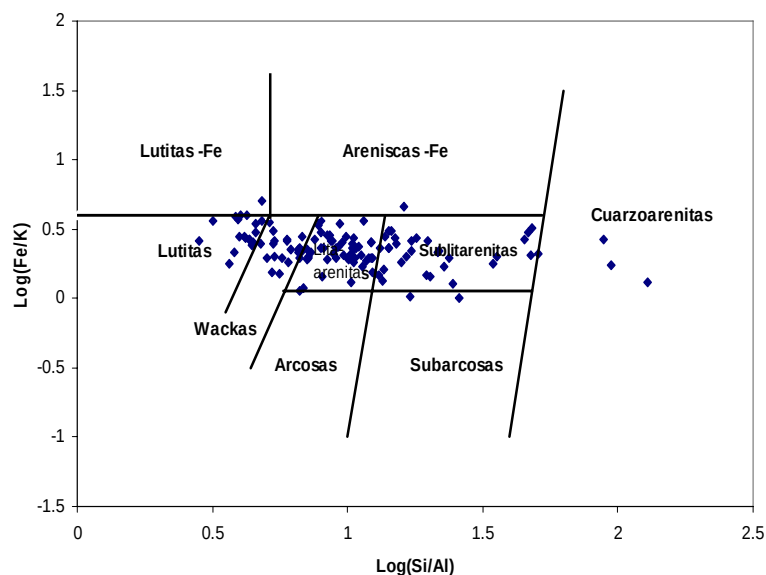


Figura 5.8. Ubicación de las muestras del pozo B en el esquema de clasificación de HERRON (1988).

Para el pozo B los grupos litológicos más importantes son lutitas, wackas, litarenitas y sublitarenitas (figura 5.8). Tres de las muestras se clasifican claramente como cuarzoarenitas también se encuentran muestras que se ubican en los límites de arcosas, subarcosas, lutitas-Fe y areniscas-Fe (Anexo N° 3).

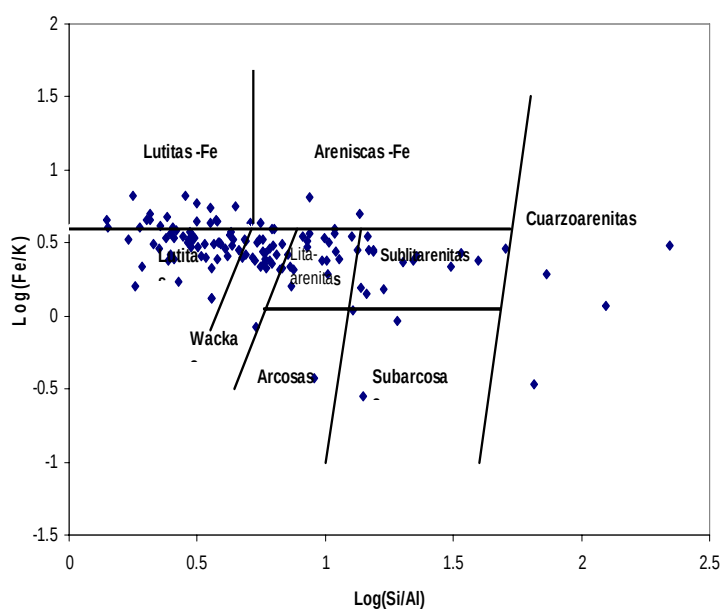


Figura 5.9. Ubicación de las muestras del pozo C en el esquema de clasificación de HERRON (1988).

En la figura 5.9 el pozo C la mayor cantidad de muestras se encuentra concentrada en las siguientes litologías lutitas, wackas, litarenistas, sublitenistas y lutitas-Fe, en menor proporción se encontraron: cuarzoarenitas, arcosas, subarcosas y arenicas-Fe (Anexo N° 5).

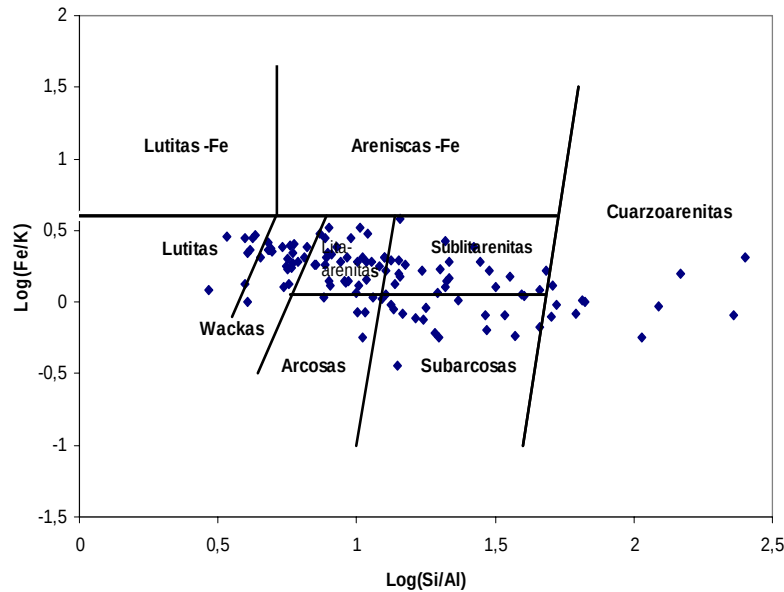


Figura 5.10. Ubicación de las muestras del pozo C en el esquema de clasificación de HERRON (1988).

El pozo D se caracteriza por presentar litologías de lutitas, wackas, litarenitas, sublitenistas y subarcosas. Un número menor de muestras se encuentra repartido entre cuarzoarenitas y arcosas (Anexo N° 6).

En los esquemas de clasificación de HERRON (1988) se observó que los pozos de A y D son los que presentan el mayor contenido de distintos tipos de areniscas con pocas litologías lutíticas, mientras que los pozos C y B presentan mayor contenido de litologías lutíticas y wackas. Ya que los pozos ubicados al oeste (A y D) presentan mayor contenidos de areniscas y los que se localizan al este (B y C) son más lutíticos, pareciera que el sentido de sedimentación probablemente sea oeste-este. Sin embargo DUGARTE (2008) explica que esta depositación se debe a que los pozos A y D se encuentran bajo mayor influencia de canales distributarios, mientras que los pozos B y C se ubican en secuencias intercanales.

5.4. Descripción litológica general de cada pozo

Para la descripción litológica de cada pozo se recurrió a la información previamente procesada como estudios de núcleos donde se determinó la sedimentación y la estratigrafía como fue el caso del pozo A. Debido a que en los restantes pozos no se contó con la extracción de núcleos, se utilizó registros de pozos que se tenían de los mismos para interpretar la litología, como es el registro mineralógico perteneciente a la empresa Baker Hughes, el cual suministra una litología estimada a partir del registro de espectroscopía elemental.

5.4.1. Litología general del pozo A

Para este pozo se tiene una descripción sedimentaria detallada realizada por DUGARTE (2008) en la cual expone esta sección como una secuencia estratigráfica que se caracteriza por una sedimentación típica de ambientes deltaicos dominados por mareas, donde la litología correspondiente se define de la siguiente forma:

- A la profundidad de 2039' – 1965' se presenta una litología correspondiente a una zona lutítica finamente laminada de color marrón claro a grises, presentando estratificaciones plana y cruzado de bajo ángulo.
- Entre la profundidad de 1965' – 1740' se presenta una secuencia mayormente arenosa. Hacia el tope de este intervalo se encuentran secuencias de heterolitas arenosas con alta impregnación que van pasando en la parte central progresivamente a arenas de grano fino y medio, mientras que hacia la base se cambian a arenas de grano grueso.
- Dentro de las profundidades de 1740' – 1675' la litología corresponde con lutitas laminadas que alternan colores claros y oscuros, con estratificaciones planas.
- Para las profundidades de 1675' – 1551' la litología presente se define hacia el tope como intercalaciones de capas de areniscas con capas de heterolitas tanto

lutíticas como arenosas, mientras que hacia la base aumenta el contenido de lutitas.

La figura 5.11 muestra una columna estratigráfica general realizada a partir del trabajo de DUGARTE (2008) conjuntamente con los datos del registro mineralógico.

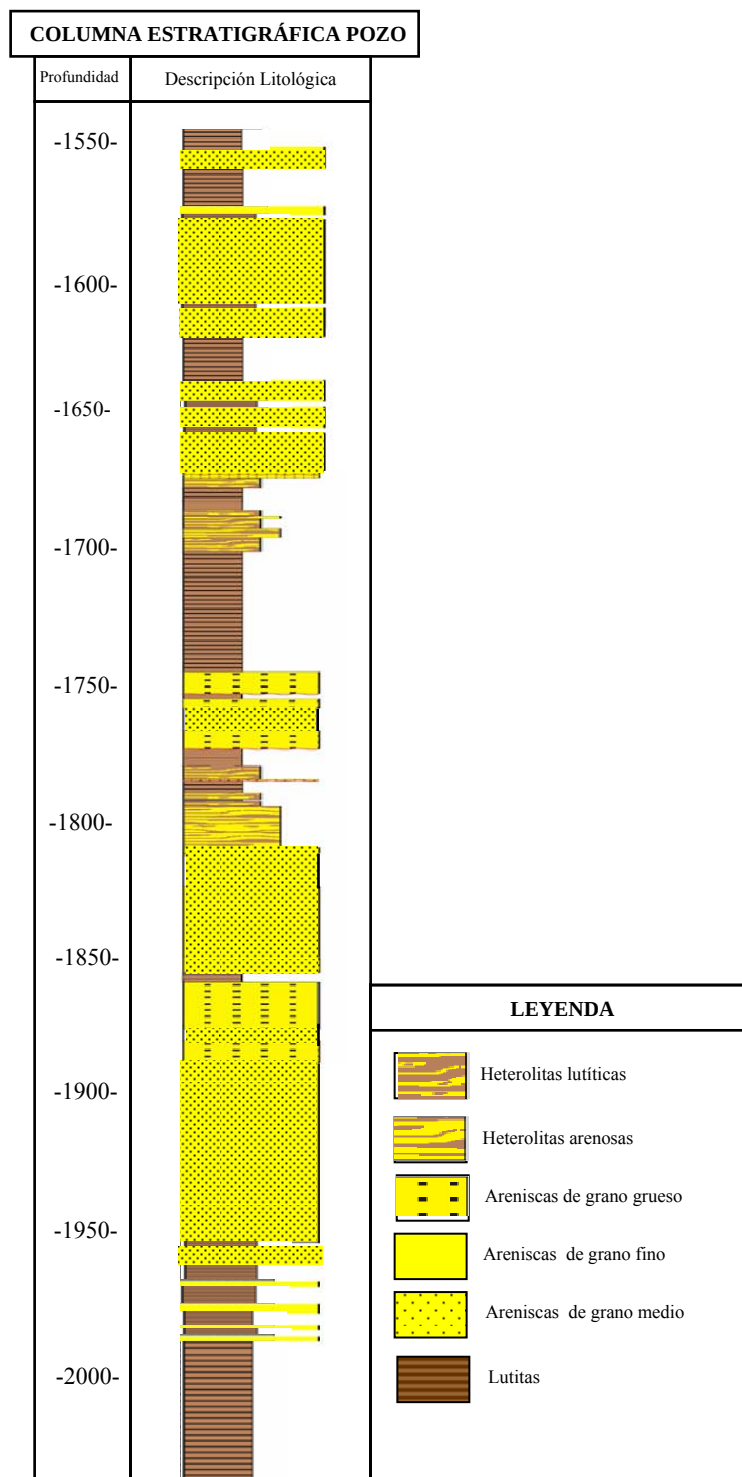


Figura 5.11. Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo A. profundidad en pies (Tomada de DUGARTE 2008)

5.4.2. Análisis petrográficos del pozo A

En el pozo A se contó con trece secciones petrográficas tomadas por la empresa PDVSA-Magna Reserva de forma aleatorias a lo largo del mismo, desde la profundidad de 1113' hasta 2398', las cuales corresponden con muestras de pared de arenas impregnadas de petróleo. Estas muestras por lo cual fueron tratadas para eliminar este efecto, lo que trajo consigo la alteración de la porosidad propia de la roca así como el contenido de matriz de la misma. Por esta razón es de esperarse que la presencia de las areniscas tipo wackas no se puedan preservar en las petrográficas. En el Anexo N° 7 se muestra una tabla con las características más importantes de las secciones petrográficas descritas.

Dentro de las petrografías estudiadas se encontró, que según la clasificación de PETTJOHN (1987) las muestras corresponden: a nueve cuarzoarenitas, tres areniscas subfeldespáticas y una litarenitas.

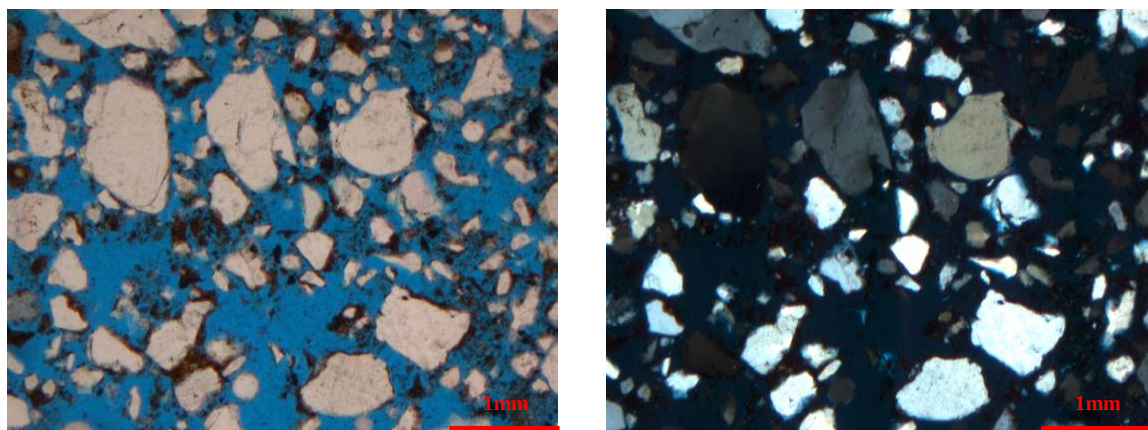


Figura 5.12. En las fotografías se muestra una vista bajo nícoles paralelos (derecha) y nícoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1610' clasificada según PETTJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto con nícoles paralelos (derecha) se puede apreciar como existe una gran proporción de color azul el cual corresponde al teñido realizado para diferenciar la porosidad de la roca, donde ésta se asocia a porosidad inducida por el proceso de eliminación del hidrocarburo.

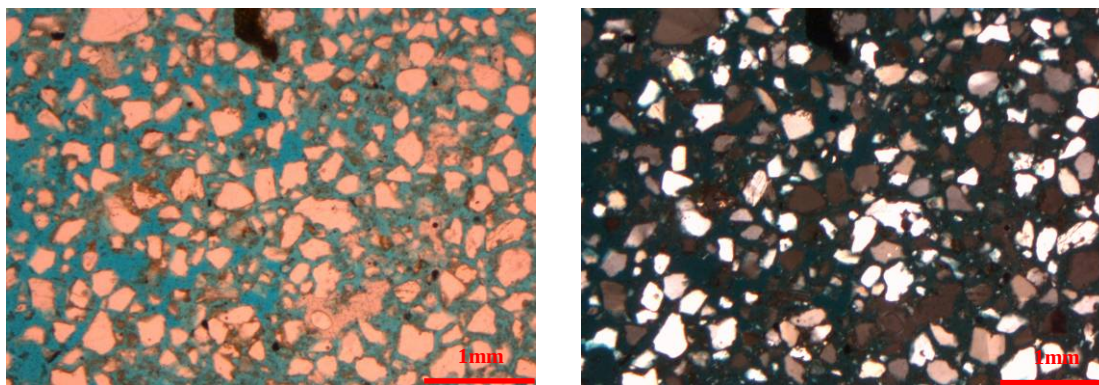


Figura 5.13. En las fotografías se muestra una vista bajo nícoles paralelos (derecha) y nícoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 2349' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una cuarzoarenita. Se puede apreciar el alto contenido de porosidad inducida (color azul) y el la subangularidad de los clastos en su mayoría de cuarzo.

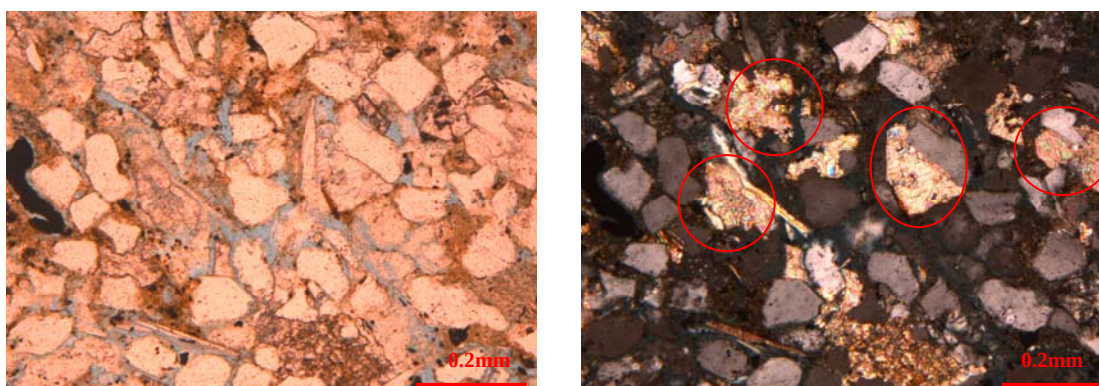


Figura 5.14. En las fotografías se muestra una vista bajo nícoles paralelos (derecha) y nícoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1692' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto de la izquierda podemos ver como existe la presencia de cemento de calcita señalado en los círculos rojos.

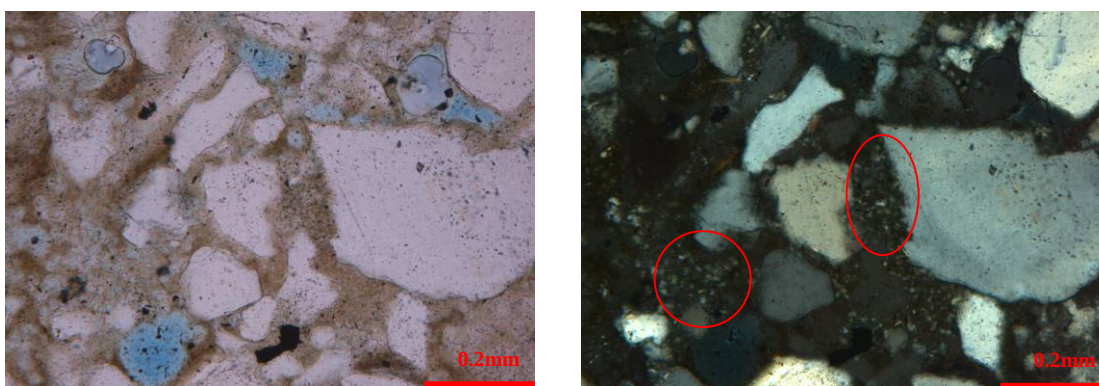


Figura 5.15. En las fotografías se muestra una vista bajo nícoles paralelos (derecha) y nícoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 2398' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una cuarzoarenita. En la foto se puede apreciar como la matriz que se logró conservar es mayormente caolinita.

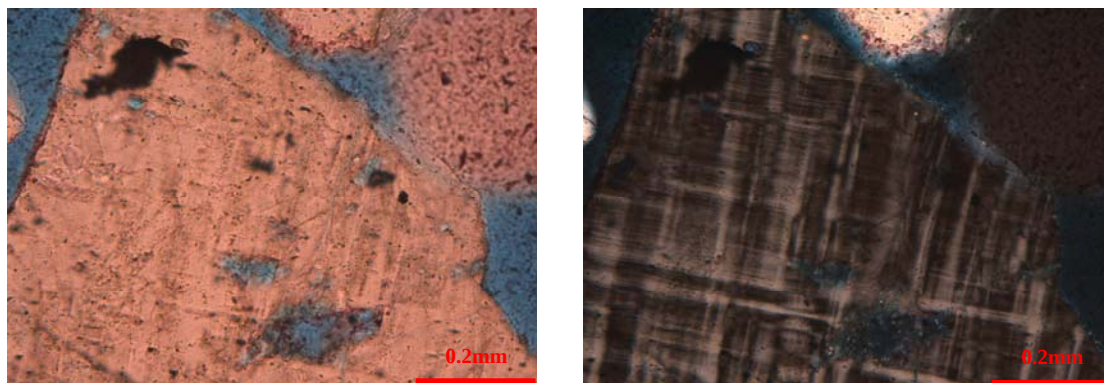


Figura 5.16. En las fotografías se muestra una vista bajo nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1750' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una areniscas subfeldespática. En la foto se puede apreciar un cristal de feldespato potasico (microclino) que se encuentra alterado.

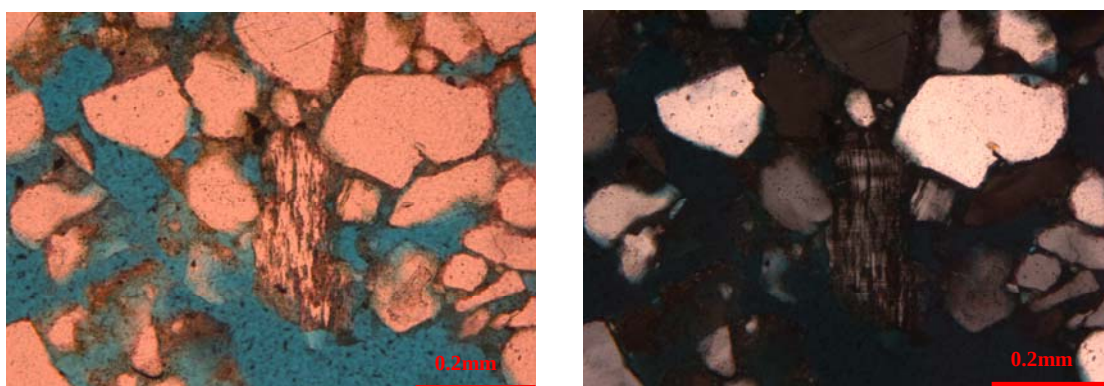


Figura 5.17. En las fotografías se muestra una vista bajo en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1646' clasificada según PETTIJOHN (1987) como unas areniscas subfeldespática. En la foto se puede apreciar un cristal de feldespato potasico (microclino) que se encuentra altera, de igualmente se aprecia la alta porosidad inducida por la eliminación de hidrocarburos.

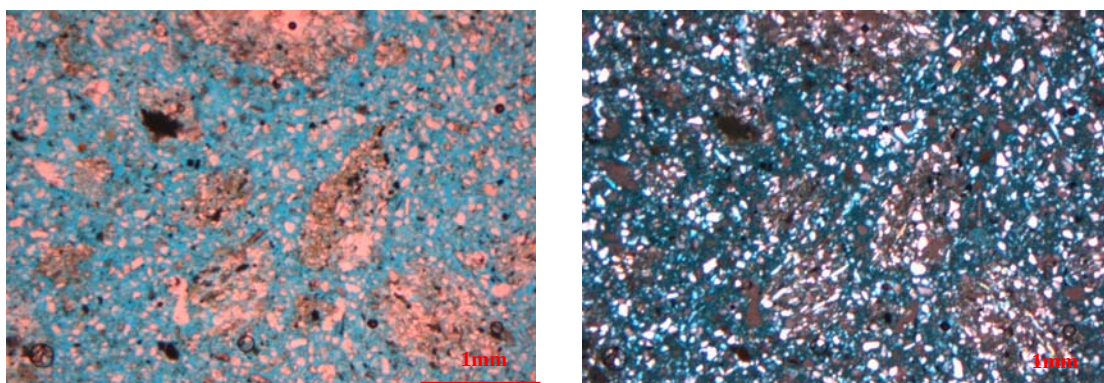


Figura 5.18. En las fotografías se muestra una vista bajo nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. En la foto se puede apreciar que los clastos son de poco tamaño (por debajo de los 0.1 milímetros) y posee alta porosidad.

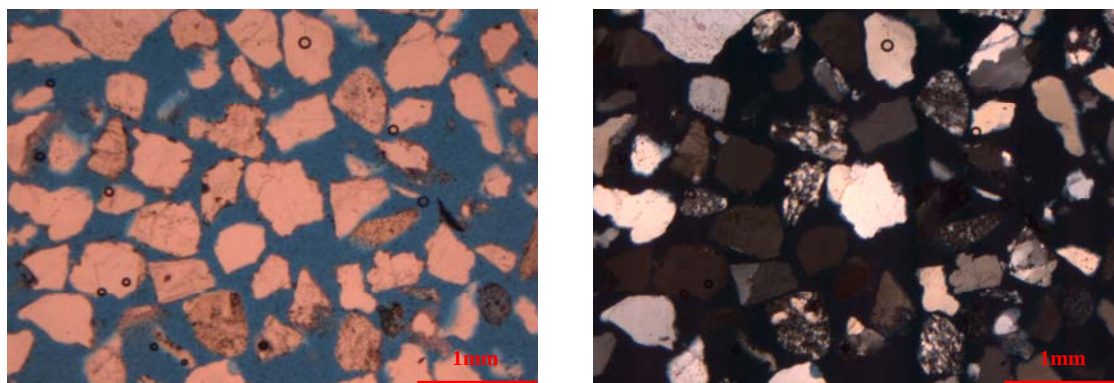


Figura 5.19. En las fotografías se muestra una vista bajo nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. Se puede apreciar los fragmentos de roca.

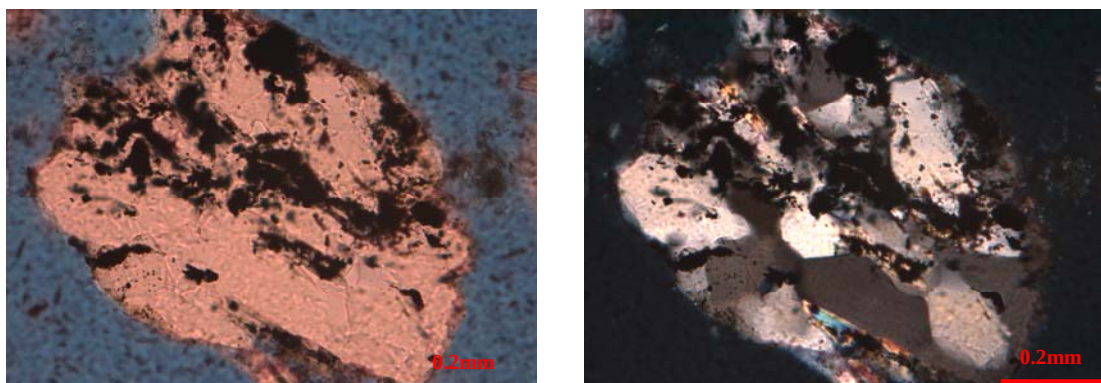


Figura 5.20. En las fotografías se muestra una vista bajo nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda) de una arenisca tomada a la profundidad de 1128' clasificada según PETTIJOHN (1987) como una litarenita. Se puede apreciar los fragmentos de roca ígnea.

5.4.3. Litología general del pozo B

Para este pozo no se realizó la extracción de núcleo, por lo cual sólo se contó con los registros petrofísicos y como el registro mineralógico, de los cuales se obtuvo una litología general que mayormente consiste en intercalación de lutitas y arenas que se describe a continuación. La figura 5.21 muestra una columna estratigráfica estimada para este pozo generado por el registro mineralógico.

- Entre las profundidades de 1941' – 1880' se observa un intervalo de intercalación de lutitas y areniscas donde las capas son de poco espesor aproximadamente 3' (90cm). Hacia la base de éste aumenta el contenido de lutitas, mientras que hacia el tope aumentan las areniscas.
- En el intervalo de 1880' – 1845' se presenta como una zona mayormente arenosa con poca presencia de capas de lutitas, mientras que hacia el tope y base aumenta la presencia de capas de lutitas 5' a 3' (1,5 a 0,90 m).
- Entre 1845' – 1820' se encuentra una zona de lutitas con escasas capas de arenas que se hacen más abundantes hacia el tope de aproximadamente 3' (90cm) de espesor.
- El intervalo de 1820' – 1720' se caracteriza por presentar algunas capas de lutitas de muy poco espesor de 5' (1,5m) en la parte basal del mismo, mientras que para el resto del intervalo se presenta como una zona mayormente arenosa. El registro mineralógico señala que las areniscas presentan contenidos de material arcilloso.
- El intervalo de 1720' – 1700' se presenta como una zona lutítica.
- El intervalo de 1700' – 1600' en comparación con el intervalo anterior pasa ser una intercalación de areniscas–lutitas.

- El último intervalo de 1600' – 1440' estudiado corresponde a una zona mayormente lutítica, que hacia la base pasa a una intercalación lutitas – areniscas, mientras que hacia el tope es una espesa lutita con ocasionales areniscas de poco espesor.

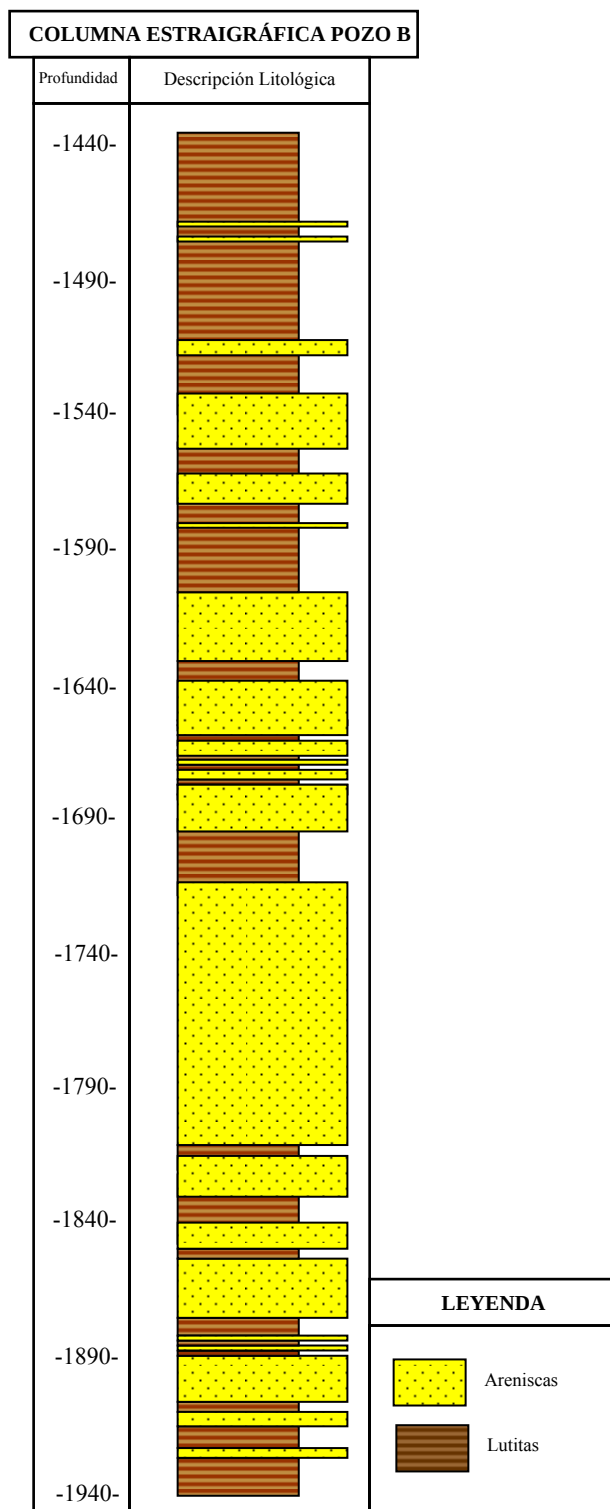


Figura 5.21. Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo B. profundidad en pies

5.4.4. Litología general del pozo C

Al igual que en el pozo anterior, sólo se contó con el registro mineralógico para la descripción de la litología, mostrada a continuación:

- Hacia la parte basal del intervalo estudiado, específicamente a la profundidades de 1833' – 1770' se compone de lutitas con capas muy delgadas de arenas 2' (0.61 m), adicionalmente intercaladas se presentan unas capas no mayores a 5' (1.5 m) de carbones.
- El intervalo de 1770' a 1540' se compone de una intercalación de areniscas y latitas, donde las areniscas según el registro poseen alto contenido de arcillas.
- El intervalo encontrado a la profundidad de 1540' – 1410' se caracteriza por una secuencia mayormente lutítica con capas delgadas de areniscas de aproximadamente 4' (1,2m).
- El intervalo 1410' – 1350' se presenta como grandes capas de areniscas donde no reconoce capas de otra litología.
- El intervalo entre los 1535' – 1350' corresponde con areniscas de espesores mayores a los 20' (6,1m) donde hacia el tope aumentando el contenido de lutitas.
- El último intervalo a los 1350' – 1320' se observa como un zona de lutitas de aproximadamente 15' (4,6m) que hacia el tope va aumentando el contenido de lutitas.

Una descripción general de la litología correspondiente a este pozo se encuentra representada de manera esquemática en la figura 5.22 donde se muestra una columna estratigráfica generada por el registro mineralógico.

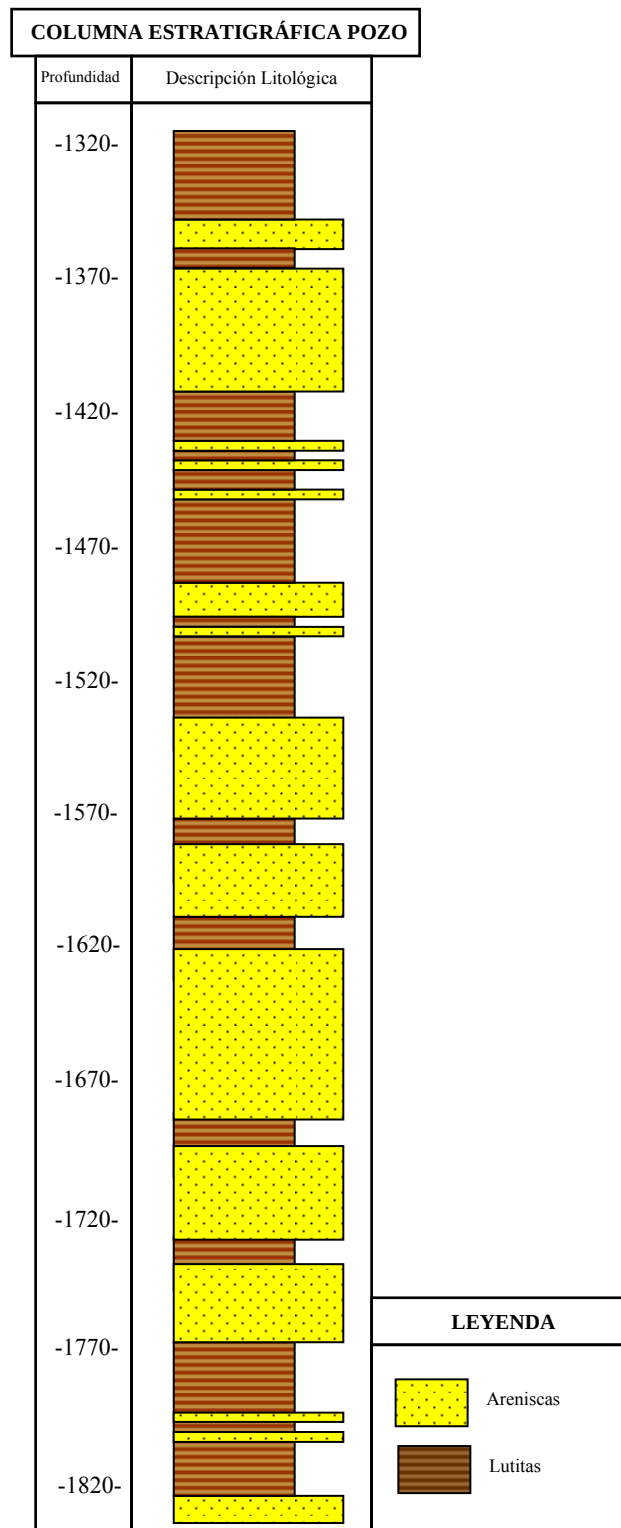


Figura 5.22. Columna estratigráfica idealizada correspondiente al pozo C. profundidad en pies

5.4.5. Litología general del pozo D

La litología general para este pozo se realizó igualmente que los anteriores pozos a partir de la interpretación registro mineralógico. Igualmente que en los pozos anteriores se presenta una columna estratigráfica esquemática del pozo D en la figura 5.23.

- El intervalo ubicado en la profundidad de 1739' – 1700' se caracteriza por tener unas grandes capas de lutitas.
- El intervalo de 1700' – 1750' se encuentra caracterizado por alternancia de lutitas y arenas.
- El intervalo de 1750' – 1400' se constituye una secuencia mayormente arenosa bastante monótona que se interrumpe por una capa de aproximadamente 30' a la profundidad de 1610' – 1580' compuesta mayormente por lutitas y una capa de carbón.
- El intervalo de 1400' – 1370' se caracteriza por una intercalación de lutitas y areniscas, hacia el tope aumenta el contenido de areniscas.
- El último intervalo claramente diferenciable se encuentra entre las profundidades de 1370' – 1238' y se halla constituido fundamentalmente por capas de lutitas espesas.

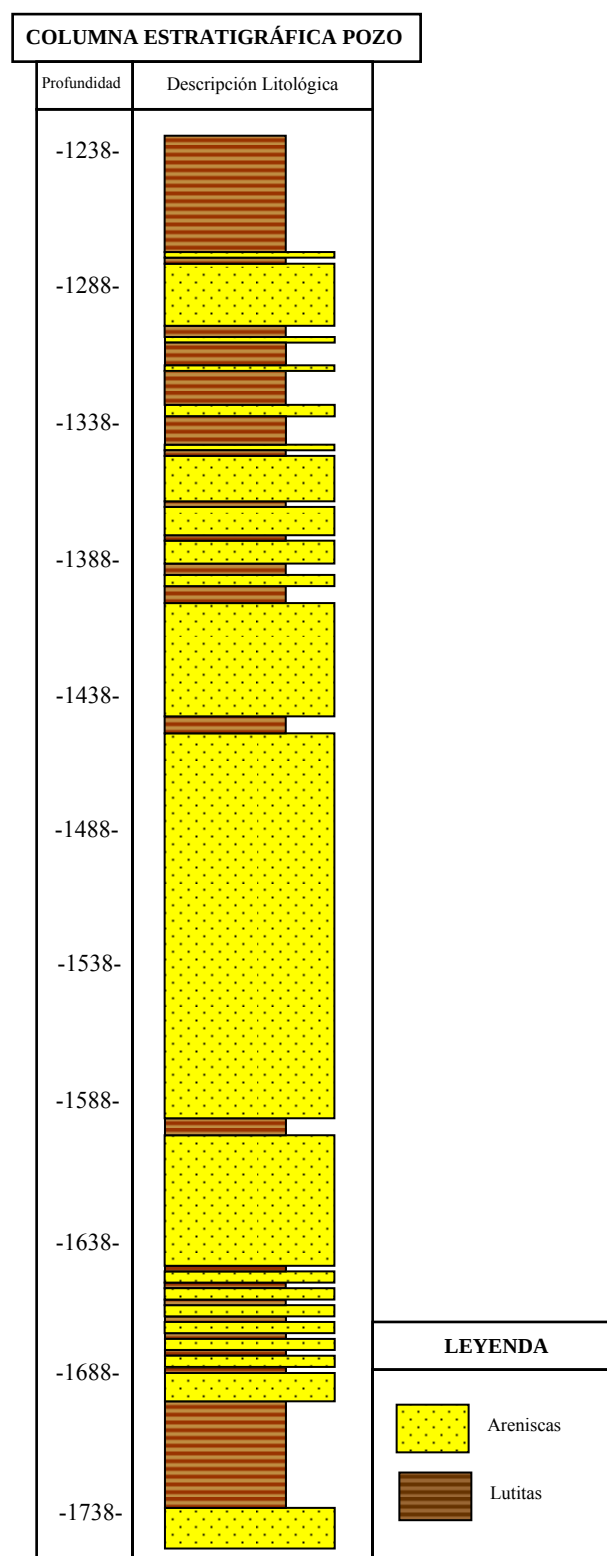


Figura 5.23. Columna estratigráfica correspondiente al pozo D. profundidad en pies

5.6. Definición de la Formación Oficina en el área de estudio

DUGARTE (2008) plantea esta área como un relleno sedimentario constituido por una secuencia basal de depósitos de llanuras de inundación con algunos abanicos de roturas, cuyo espesor oscila entre 10 y 50' (3,1 y 15,2m); seguida por una espesa secuencia de canales entrelazados apilados verticalmente con espesores que oscilan entre 270 y 350' (82,3 y 106,7m). Suprayacente a los depósitos de canales entrelazados se consigue una secuencia estratigráfica de unos 400' (121,9m) en promedio compuesta por una intercalación de depósitos de bahías interdistributarias, canales distributarios, llanuras de mareas y abanicos de rotura que evidencian la existencia de sistema deltaico mixto de influencia tanto fluvial como mareal.

Para el área estudiada en este trabajo de investigación se puede separa en tres grandes grupos litológicos, la parte inferior constituida principalmente por una intercalación de lutitas y areniscas, la parte central constituida especialmente por capas de areniscas y la parte superior mayormente por lutitas.

5.5. Definición de unidades químicas

Al momento de definir unidades químicas es necesario plantear criterios que ayuden a establecer las diferencias en las características químicas entre intervalos de una misma secuencia estratigráficas. Las variaciones químicas pueden ser observadas a través de perfiles verticales que se construyen tomando la información química. El criterio establecido consiste en determinar eventos químicos caracterizados por deflexiones importantes en cinco o más curvas de los elementos los cuales se definen como marcadores de primer orden, también se encuentran los marcadores de segundo orden que son deflexiones presentes en un solo elementos. Si las deflexiones se encuentran al mismo nivel estratigráfico este puede deberse a procesos geológicos diferentes como cambios climáticos o en las condiciones de sedimentación (NOGUERA & YÉPEZ 2002).

Para este trabajo de investigación se tomó el criterio propuesto por NOGUERA & YÉPEZ en el 2002 donde se plantea para la descripción de las unidades químicas tendencias positivas (+) de las curvas del elemento cuando su dirección promedio tiende hacia los máximos, y tendencias negativas (-) cuando al contrario las curvas presentan direcciones hacia los mínimos.

Las unidades químicas que se han definido fueron basados en los perfiles verticales de los diez elementos obtenidos por la herramienta de espectroscopía elemental los cuales son Si, Al, Ca, Mg, Mn, Gd, Fe, Ti y S más los tres obtenidos por el registros gamma ray espectral los cuales son: K, Th y U.

En los perfiles de distribución vertical de las variables químicas principalmente se encontraron cuatro unidades bien diferenciadas para todos los pozos estudiados. Los pozos A y D que son los que se encuentran más al oeste mostrando inflexiones bien marcadas en la parte inferior y superior, en la parte media las curvas se suavizan presentado pocas variaciones. Mientras que los pozos B y C ubicados al este las inflexiones no se muestran tan diferenciadas como en los pozos anteriores. Para todos los pozos las unidades se

denominaron 5, 4,..., 1 respetando el orden estratigráfico y las diferenciadas entre los otros pozos con la letra correspondiente a cada uno delante del número. Cada una de estas unidades definidas para los cuatro pozos se describirá a continuación.

5.5.1. Unidades del Pozo A

Para este pozo se emplearon 123 mediciones tomadas por la herramienta de espectroscopía elemental cada 4' desde las profundidades 1551' (472.75 m) hasta 2039' (621.45 m), y se dividió en 4 unidades mayores (figura 5.24).

5.5.1.1. Unidad mayor A-1

Esta unidad se encuentra en la parte inferior del pozo, posee un espesor de 80' (24.38 m) aproximadamente entre las profundidades de 2039' y 1959' (621.5 – 597.1 m), lo cual corresponde a la sección entre las mediciones A103 y A123.

Al observar los perfiles de distribución vertical de los elementos en la zona donde se encuentra definida esta unidad se puede señalar la existencia de inflexiones de alta magnitud implicando máximos en la parte inferior de la unidad disminuyendo hacia el tope de la misma. Esto se observa en la mayoría de las curvas (Anexos N° 8).

En la tabla 5.1 se pueden observar los valores máximos, mínimos y el promedio para cada elemento presente en las unidades que se definieron a lo largo del pozo.

Para poder establecer esta unidad se debió comparar con la unidad suprayacente a ésta, denominada Unidad A-2, para ello se observaron las diferencias entre los componentes químicos presentes en ambas unidades.

La Unidad A-1 presenta concentraciones bajas de Si con respecto a la unidad suprayacente (Unidad A-2), a diferencia de esto se observa concentraciones altas de los

elementos Al y Fe los cuales muestran promedios mayores, igualmente exhiben concentraciones altas de K, Th y U.

En esta unidad se encuentran presente dos zonas delimitadas a la profundidad de 2000' (609.6 m) representada por la muestra A113. Debajo de este límite se presentan los valores más bajos de Si de la misma e igualmente posee valores altos de K, Th y U.

CHACÍN 2003 plantea las concentraciones de Al_2O_3 como un indicador de la presencia de material detrítico de grano fino, e igualmente indica que estos valores se presentan contrarios a los de SiO_2 . Este hecho permite establecer que en esta unidad las zonas con mayor aumento de Al conjuntamente con valores altos de K, Th y U, corresponden con secciones estratigráficas con alto contenido de arcillas.

Tabla 5.1. Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo A

		Al % peso	C % peso	Ca % peso	Fe % peso	Gd ppm	Mg % peso	Mn % peso	S % peso	Si % peso	Ti % peso	K % peso	Th ppm	U ppm
A-4	Máximo	9.7	8.3	7.8	3.5	5.1	4.9	1.5	0.9	36.1	0.4	1.6	13	6
	Mínimo	0.2	1.4	0.5	1.8	0.8	0.1	0.1	0.1	20.4	0.0	0.5	1	0
	Promedio	5.0	3.5	2.2	2.7	2.8	1.4	0.1	0.3	30.1	0.1	1.0	6	3
A-3	Máximo	11.4	13.4	3.8	3.9	5.6	2.4	0.4	1.3	39.3	0.4	2.1	17	6
	Mínimo	0.5	6.2	0.1	0.9	1.2	0.1	0.1	0.1	21.6	0.0	0.8	4	2
	Promedio	6.2	11.9	1.2	2.9	3.0	0.6	0.1	0.4	29.1	0.2	1.3	10	4
A-2	Máximo	11.4	13.6	5.7	3.2	5.6	2.3	0.4	1.3	42.5	0.5	1.5	18	7
	Mínimo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1	17.1	0.0	0.6	2	0
	Promedio	3.5	2.9	1.7	1.4	3.7	0.3	0.1	0.4	35.3	0.1	1.0	6	2
A-1	Máximo	11.0	6.8	3.7	3.5	7.1	4.2	1.0	0.8	36.1	0.6	1.7	24	10
	Mínimo	3.9	0.1	0.1	0.3	0.7	0.0	0.1	0.0	19.3	0.0	0.6	6	2
	Promedio	7.6	2.1	1.5	2.5	3.0	1.1	0.1	0.2	27.3	0.2	1.2	15	6

En este trabajo se plantean un conjunto de relaciones que involucran elementos que expresan diversos factores que caracterizan a la sedimentación, el tipo de litología y los minerales que se encuentran presentes en las formaciones. Entre estas relaciones tenemos las propuestas por BRICEÑO *et al.* (1996) como SiO_2/Al_2O_3 que representa la variación de la energía al momento de la depositación, así como la relación $(SiO_2 + Al_2O_3)/CaO$ que permite determinar la proporción de sedimentación siliciclástica o carbonática.

Otras relaciones que se toman en cuenta para este trabajo de investigación están las planteadas por YARINCIK *et al.* (2000), por ejemplo la relación Al_2O_3/K_2O que permite estimar el tipo de arcilla presente a lo largo de la sección estratigráfica. Igualmente se agregó la relación Th/U que según NORTH & BOERING (1999), indica condiciones de oxidación para sedimentos de origen continental.

Tabla 5.2. Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo A

		Th/K	Al/K	Si/Al	Th/U
A-4	Máximo	13.1	10.5	223.5	10.8
	Mínimo	1.6	0.3	2.2	1.1
	Promedio	6.5	5.2	19.2	3.1
A-3	Máximo	14.4	9.3	73.1	4.7
	Mínimo	3.7	0.5	2.0	1.2
	Promedio	7.8	4.6	10.9	2.7
A-2	Máximo	12.0	10.8	395.1	34.5
	Mínimo	3.0	0.1	3.3	0.8
	Promedio	5.8	2.9	75.2	4.7
A-1	Máximo	19.1	12.0	33.3	3.6
	Mínimo	7.1	3.1	1.9	1.6
	Promedio	12.8	6.6	5.4	2.5

Todas las relaciones planteadas para este trabajo de investigación se debieron modificar ya que los valores obtenidos por el perfil estudiado son de forma elemental. En la tabla 5.2 se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para las relaciones entre los elementos que permiten establecer diferencias entre las unidades.

En la unidad A-1, la relación Si/Al tiene valores bajos y muy pocas deflexiones, indicando que en esta zona la sedimentación ocurrió con baja energía. Al observar la curva Th/U como indicador de condiciones de oxido-reducción, se observó bajos valores que se relacionan con ambientes oxigenados.

El aumento de los valores en la curva de Al/K nos indica la probabilidad de tener mayor contenido de arcillas del tipo caolinita en esta unidad, la cual aumenta en la parte inferior. Al observar la curva de Th/K se confirma la abundancia del tipo de arcillas caolinita.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad A-1

La unidad A-1 en los perfiles de frecuencia acumulada (figura 5.25) se puede distinguir por marcadores de primer orden en la mayoría de los elementos evaluados como: Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S (Anexo N° 16).

El Si se comporta con una pendiente promedio casi vertical indicando que la presencia de este elemento se mantiene baja y casi constante en toda la unidad.

El Al, Fe, Th, U y K presentan una conducta diferente ya que sus pendientes generales cambian verticalmente, sugiriendo que dentro de la unidad el contenido de estos elementos aumenta con variaciones significativas. En las curvas de Ti, Ca y S se presentan marcadores de segundo orden en distintas profundidades.

5.5.1.2. Unidad mayor A-2

Esta unidad se encuentra suprayacente a la unidad A-1, posee un espesor aproximado de 212' (64,6m) entre las profundidades de 1955' - 1743' (595.9 – 531.3 m) y sus límites corresponden a las muestras A102 y A49 respectivamente. Al observar esta unidad se destaca que la mayoría de las curvas de los elementos evaluados se caracterizan por inflexiones de baja magnitud.

La curva del elemento Si posee los mayores valores en todo el pozo y se caracteriza por tener pocas inflexiones, donde los valores de Si van disminuyendo hacia el tope. Así mismo el elemento Gd presenta un comportamiento parecido al del Si donde la diferencia entre ambos son las magnitudes en las deflexiones.

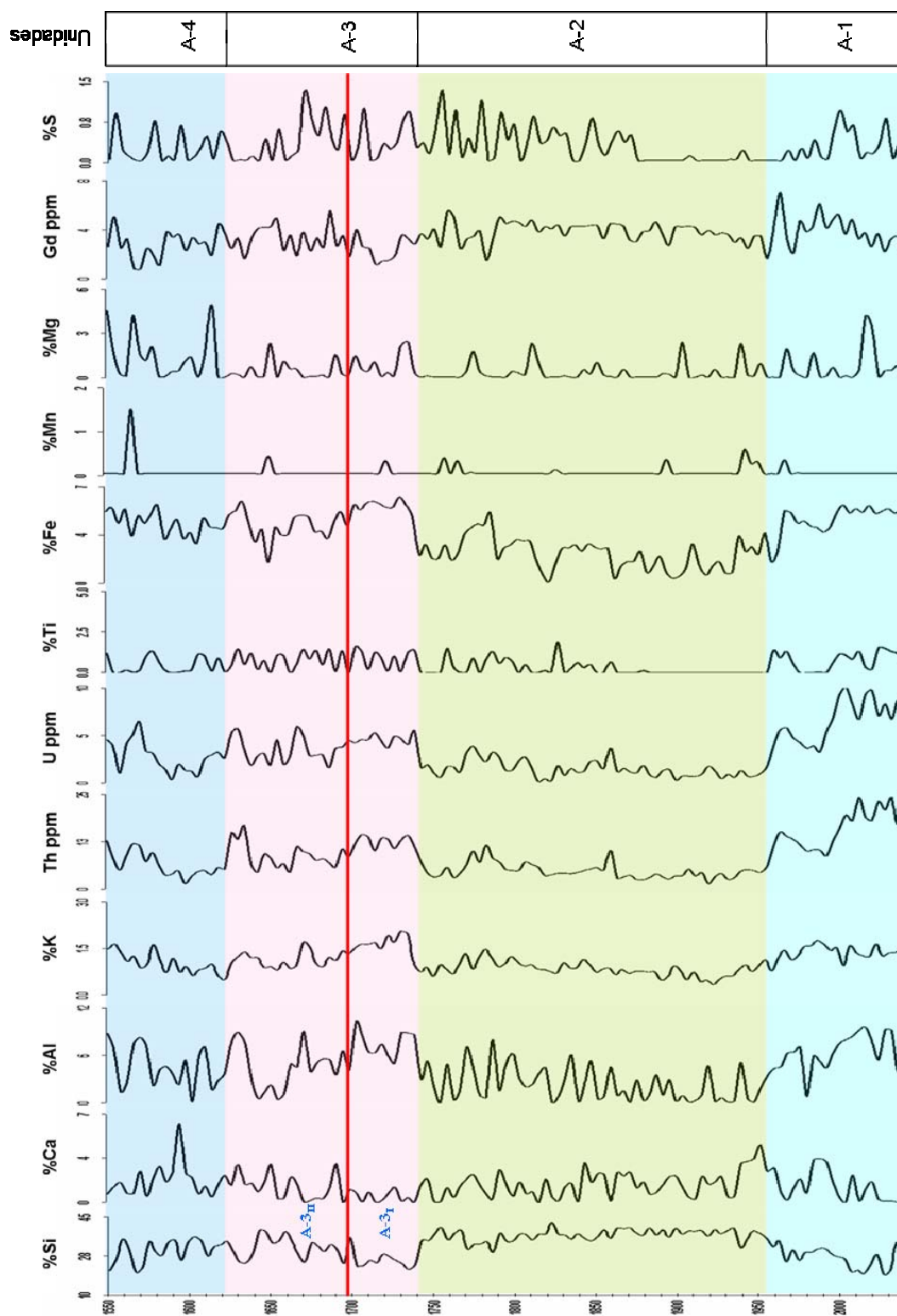


Figura 5.24. Perfiles verticales del pozo A donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies. La línea roja indica la separación en subunidades.

A diferencia del comportamiento de los elementos anteriores, la curva del elemento Al presenta gran cantidad de deflexiones a lo largo de la misma aunque la tendencia general de la curva es pasar de valores mínimos en la base a valores altos hacia el tope (tendencia positiva).

Por su parte, la curva del elemento Fe se mantiene con baja presencia de inflexiones dentro de la unidad tomando tendencia positiva con valores mínimos en la base que aumentan levemente hacia el tope.

Las curvas de los elementos Th, K y U presentan comportamientos similares entre sí con inflexiones de poca magnitudes y adquiriendo valores mínimos a lo largo de toda la unidad aumentando levemente hacia el tope (tendencia positiva).

En todas las curvas se marca una variación notable en la tendencia general de esta unidad; entre las profundidades de 1770' – 1795' (539,5 – 547,1 m) se presenta una disminución de la curva de Si y un aumento en las curvas de Al, Fe, K, Th y U, lo cual podría relacionarse con zonas de mayor contenido de material arcilloso a diferencia del resto de la unidad. Según el comportamiento de los elementos, esta unidad se corresponde con una zona arenosa que hacia el tope posee un aumento en el contenido de arcillas.

En la tabla 5.1 se observan los valores máximos, mínimos y el promedio de todos los elementos para la Unidad A-2. En esta tabla se observa como los valores de Si poseen un promedio de 35,3% a diferencia de la unidad infrayacente que se encuentra alrededor del 27,3%; así mismo se observar como los elementos Al, Fe, K, Th y U presentan los promedios más bajos.

En la relación Si/Al se muestra bien limitada esta unidad, caracterizándose por la presencia de grandes inflexiones a lo largo de la misma con máximos y mínimos bien pronunciados indicando que esta unidad tiene gran contenido de sedimentos arenosos exceptuando la zona señalada a la profundidad de 1770' – 1795' (539,5 – 547,1 m) donde la curva se suaviza tomando valores mínimos.

La relación Th/U muestra como en la base de la unidad, entre los 1950' y los 1890', los valores son máximos y mantienen una tendencia uniforme, lo que indica que esta zona al momento de depositación tuvo mayor oxigenación que el resto de las unidades.

El tipo de minerales de arcilla para esta unidad se estima con las curvas de Th/K y Al/K, los cuales muestran un comportamiento uniforme a lo largo de estas curvas sólo con algunas inflexiones de mayor magnitud hacia la base de la unidad lo que se adjudica a la presencia de arcillas del tipo caolinita, mientras que en el resto de la unidad aumenta el volumen de arcillas con contenido de K.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad A-2

En los perfiles de frecuencia acumulada (figura 5.24) para esta unidad se muestra que el tope y la base de la misma se encuentran definidos por marcadores de primer orden que se observan en los siguientes elementos: Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S, así como en el cambio de pendientes tanto para la unidad suprayacente y la infrayacente; tal y como se puede observar en la Anexo N° 16.

En cuanto al elemento Si, su comportamiento pasa de una pendiente alta en la unidad anterior a una pendiente menor, indicando que existe un aumento del mismo. Este mismo comportamiento se observa en la curva de Ca.

En el caso de los elementos Th, K, U, Al y Ti, estos elementos exhiben un comportamiento diferente; sus pendientes tienden a verticalizarse indicando que su contenido dentro de la unidad es mucho menor que en la anterior.

Dentro de esta unidad no se observan marcadores importantes de segundo orden en ninguno de los elementos estudiados.

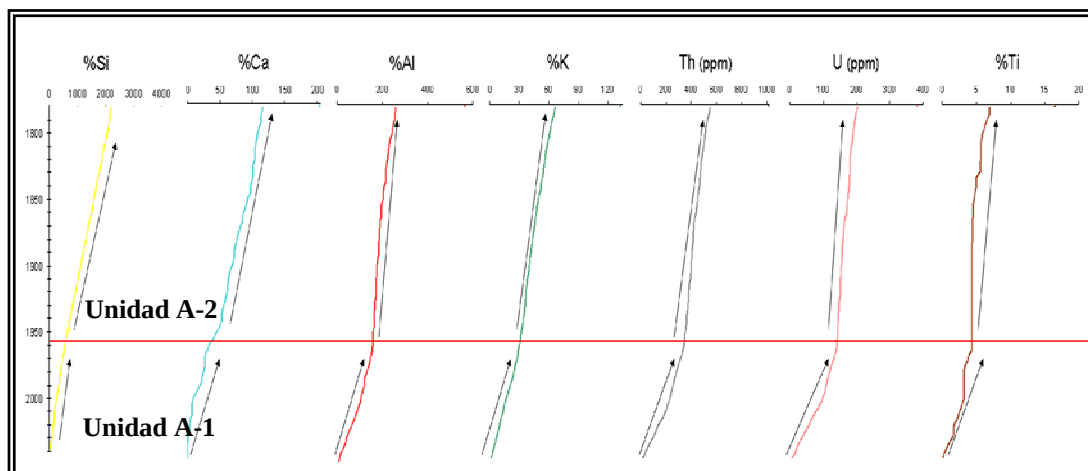


Figura 5.25. Perfil de frecuencia acumulada de los datos del perfil de espectroscopía elemental que muestra el cambio de pendiente entre las unidades A-1 y A-2 en siete elementos estudiados.

5.5.1.3. Unidad mayor A-3

Esta unidad tiene 120' (36,6m) de espesor y se ubica entre las profundidades de 1743' a 1627' (531,3 – 495,9m) representadas por las muestras A48 y A20. Esta unidad se encuentra dividida en dos subunidades descritas a continuación:

Subunidad A-3₁

Esta subunidad posee un espesor de apenas 72' (21,9m) de espesor y se ubica entre las profundidades de 1743' a 1671' (531,3 – 509,3m) representadas por las muestras A48 y A31. La subunidad se encuentra delimitada de la anterior A-2 por una inflexión bien marcada en todas las curvas de los elementos.

En la curva de Si se observa una disminución de los valores con respecto a la subunidad infrayacente; dicha curva muestra una tendencia positiva que va de valores mínimos en la base hacia valores máximos en el tope.

Las curvas de Gd y S definen bien esta subunidad, mostrando inflexiones menos pronunciadas pero que igualmente marcan una tendencia positiva.

La curva de Al presenta un comportamiento contrario a la mostrada por el elemento Si ya que poseen una tendencia positiva pasando de valores máximos en la base a valores mínimos hacia el tope de la subunidad. El elemento Fe mantiene este mismo comportamiento con máximos valores en la base y mínimos en el tope.

Para el caso de la curvas de los elementos K, Th y U, se observa el mismo comportamiento de los elementos señalados anteriormente donde las curvas muestran una tendencia negativa pasando de valores máximos a mínimos. Todos estos valores nos indican que a lo largo de esta subunidad la litología corresponde a una zona lutítica en la base que hacia el tope se vuelve más arenosa.

A la profundidad de 1740' (530,4m) se encuentra un punto de inflexión donde cambia levemente la tendencia general que se muestra en todas las curvas. Para el caso del Si disminuye los valores suavemente mientras que en el resto de los elementos aumenta levemente.

En la relación Si/Al se observa para toda la subunidad valores mínimos sin presentar inflexiones que se puedan relacionar con presencia de material arcilloso significativo.

La curva de Al/K muestra valores máximos que se encuentran relacionados con el contenido de minerales de arcillas ricas en Al como la caolinita; esto se reconfirma al observar la curva de la relación Th/K, donde los valores se mantienen constantes con una tendencia positiva en la subunidad.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la subunidad A-3_I

Esta subunidad se caracteriza dentro de los perfiles como un cambio delimitado por un marcador primario presente en los elementos Al, Ca, Th, U, K y Fe, a pesar que en el elemento Si no se observó ningún cambio. En estos perfiles no se puede diferenciar con precisión el límite con la subunidad siguiente (figura 5.26).

Para el caso del Si, como se mencionó en el párrafo anterior, el cambio entre las subunidades no se pudo distinguir con claridad ya que la curva mantiene una pendiente casi constante y sólo presenta una leve tendencia a verticalizarse, lo cual sugiere que los valores permanecen constantes con una leve disminución.

En cuanto a los elementos Al, Th, U, K y Fe, éstos muestran una pronunciada variación en su tendencia pasando de una pendiente alta a una pendiente menor, lo que hace inferir que el contenido de ellos aumenta.

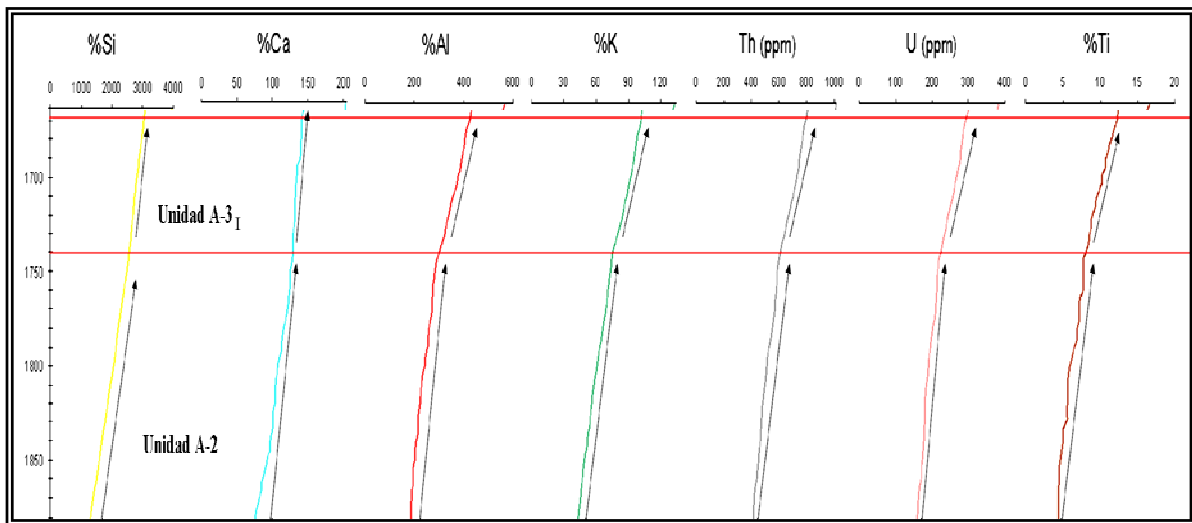


Figura 5.26. Perfil de frecuencia acumulada que muestra el cambio de pendiente entre las unidades A-2 y A-3_I en siete elementos estudiados.

Subunidad mayor A-3_{II}

Esta subunidad se encuentra definida entre las profundidades de 1667' y 1627' (508,1 – 495,9 m) que corresponde con las muestras A30 –A20 y tiene un espesor de 40' (12,2 m). En esta subunidad las curvas presentan inflexiones muy marcadas y de alta magnitud.

La curva de Si, con respecto a la subunidad A-3_I, muestra valores máximos a lo largo de la misma pero hacia el tope se presentan una gran inflexión a los 1640' (499,9 m) donde toma valores mínimos.

La curva de Al presenta valores mínimos casi en toda su totalidad con respecto a la subunidad evaluada anteriormente. Se destaca la excepción en el punto mencionado anteriormente de 1640' (499,9 m) donde se presenta una gran inflexión y en el cual la curva alcanza valores máximos.

La curva del elemento Fe presenta el mismo comportamiento de la curva de Al mostrando valores mínimos en casi toda la subunidad, excluyendo la inflexión que se señala anteriormente donde alcanzan valores máximos. Las curvas de K, Th y U mantienen la misma tendencia de valores mínimos y poseen la misma inflexión de magnitud alta.

La forma que mantienen estas curvas se relaciona con una zona de alto contenido de areniscas que hacia el tope (profundidad de 1640' (499,9 m)) aumenta el contenido de arcillas probablemente por la presencia de lutitas.

En la relación Si/Al se muestra valores mínimos a lo largo de toda la subunidad, exceptuando la profundidades entre 1660' y 1640' (506 - 499,9 m) donde se presentan dos inflexiones de moderada magnitud (Anexo N° 8). La curva de Th/U se muestra con muy bajos valores y con pocas inflexiones, sugiriendo que esta zona se depositó en ambientes oxigenados.

En las relaciones Al/K y Th/K se infiere el contenido de arcillas a lo largo de la subunidad. La tendencia de estas curvas presentan inflexiones de baja magnitud, exceptuando la presente a los 1640' (499,9 m), donde aumentan sus valores. Hacia la parte basal de esta subunidad, se encuentran menores contenidos de arcillas ricas en Al y Th lo cual corresponde a caolinita. El caso contrario sucede para el tope de la subunidad donde aumenta el contenido de este tipo de arcillas.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la subunidad A-3_{II}

Dentro de los perfiles de frecuencia acumulada no es fácilmente reconocible su límite con la subunidad A-3_I. Los marcadores de primer orden sólo se observan en los elementos

Al, Th, U y K. El caso contrario ocurre con límite entre la subunidad superior donde el marcador primario se muestra en casi todos los elementos (Anexo N° 16).

Para el elemento Si se encuentra que la pendiente tiene una variación casi imperceptible, mostrando una pendiente constante con respecto a la subunidad anterior. Sin embargo, en los elementos Th, U, K y Al se observa una leve variación en la pendiente de las curvas que evidencian un aumento en su valor.

5.5.1.4. Unidad mayor A-4

La última unidad definida en este pozo se encuentra localizada en el tope del mismo entre las profundidades de 1623' y 1551' (494,7 - 472,7 m) y sus límites corresponden con las muestras A19 y A1 y tiene un espesor de 72' (21,9 m).

La curva del elemento Si presenta un gran número de inflexiones con moderada magnitud a lo largo de la unidad. La tendencia general es negativa pasando en la base de valores máximos a valores mínimos hacia el tope. El promedio de este elemento en la unidad se encuentra alrededor del 30% aproximadamente, disminuyendo en comparación con la unidad infrayacente (tabla 5.1.).

La curva de Al muestra un gran número de inflexiones de moderada magnitud que aumenta en la parte superior, mostrando una tendencia positiva donde aumentan los valores hacia el tope de la unidad. La curva de Fe presenta inflexiones de baja magnitud, mostrando leves variaciones de los valores donde tienden a aumentar hacia el tope (tendencia positiva). Los promedios para los elementos Al y Fe se encuentran alrededor del 5% y 3% respectivamente, lo que significa una disminución leve con respecto a la unidad anterior.

Las curvas de Th, K y U presentan inflexiones de baja magnitud, mostrando una tendencia positiva donde los valores aumentan hacia el tope de la unidad. En promedio los elementos Th, K y U disminuyen significativamente con respecto a la unidad anterior, tomando los valores de 6,5%, 1% y 2,7% respectivamente.

Esta unidad corresponde a una zona arenosa donde aumenta el contenido de arcillas hacia el tope de la misma.

La curva de la relación Si/Al muestra inflexiones de baja magnitud a lo largo de toda la unidad lo que indica un aumento del contenido de areniscas, ya que su contenido disminuye hacia el tope.

La relación de Al/K muestra inflexiones de magnitud moderada dentro de toda la unidad manteniendo en promedio valores alto que disminuyen hacia el tope (tendencia negativa). Al observar la relación Th/K podemos ver una tendencia diferente, con valores bajos en la unidad exceptuando el punto anómalo que se encuentra a la profundidad de 1570' donde esta relación toma valores máximos.

Para la relación Th/U se observa que hacia la base de la unidad se encuentran las inflexiones de mayor magnitud y hacia el tope se encuentra más suavizada, lo cual indica que hacia la base existe mayor influencia de ambientes oxigenados.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad A-4

Esta última unidad en los perfiles de frecuencia acumulada puede diferenciarse con claridad en comparación con la anterior ya que se presentan marcadores de primer orden en las curvas de Al, K, Th, U, Al, Fe, Ca, Ti, Mg y S. Igualmente se presentan marcadores secundarios de esta unidad en las curvas de Ca y Mg (Anexo N° 16).

En el perfil del elemento Si se observa una inflexión leve, cambiando la pendiente a valores más altos que indican que en esta unidad la variación en el contenido del mismo no aumenta. En cuanto a los elementos K, Th, U, Al y Fe, el cambio que presenta con respecto a la unidad inferior es que el valor de la pendiente baja, sugiriendo que el contenido de estos elementos es mayor.

5.5.2. Unidades del Pozo B

Para este pozo se contó con 126 mediciones tomadas por la herramienta de espectroscopía elemental con una frecuencia de 4' entre ellas, partiendo de la profundidad de 1941' (591,6 m) hasta 1441' (439,2 m) para un total estudiado en este pozo de 500' (152,4 m). En la secuencia se reconocieron 4 unidades mayores (figura 5.27) que se describen a continuación.

5.5.2.1. Unidad mayor B-1

La primera unidad se encuentra en la parte basal del pozo con un espesor aproximado de 92' (28 m) que se ubica entre las profundidades de 1941' y 1849' (591,6 – 563,6 m), lo cual corresponde a la sección entre las muestras B126 y B103. Los perfiles verticales permiten observar como dentro de esta unidad se presentan inflexiones de magnitud moderada que se pueden observar en el Anexo N° 9.

En la tabla 5.3 se encuentran los valores máximos, mínimos y el promedio para cada elemento evaluado dentro de esta unidad y sus diferencias entre las unidades definidas a lo largo del pozo.

Para la Unidad B-1, el elemento Si presenta un bajo número de inflexiones de magnitud moderada con una tendencia general positiva en donde adquiere mínimos hacia la base de la misma que luego van aumentando progresivamente hacia el tope de la unidad. En la tabla 5.3 se observa que el elemento Si presenta un promedio de 30% aproximadamente para esta unidad. Así mismo para el elemento Gd se observa un comportamiento similar al del Si pero la tendencia de aumento de los valores hacia el tope es menos pronunciada.

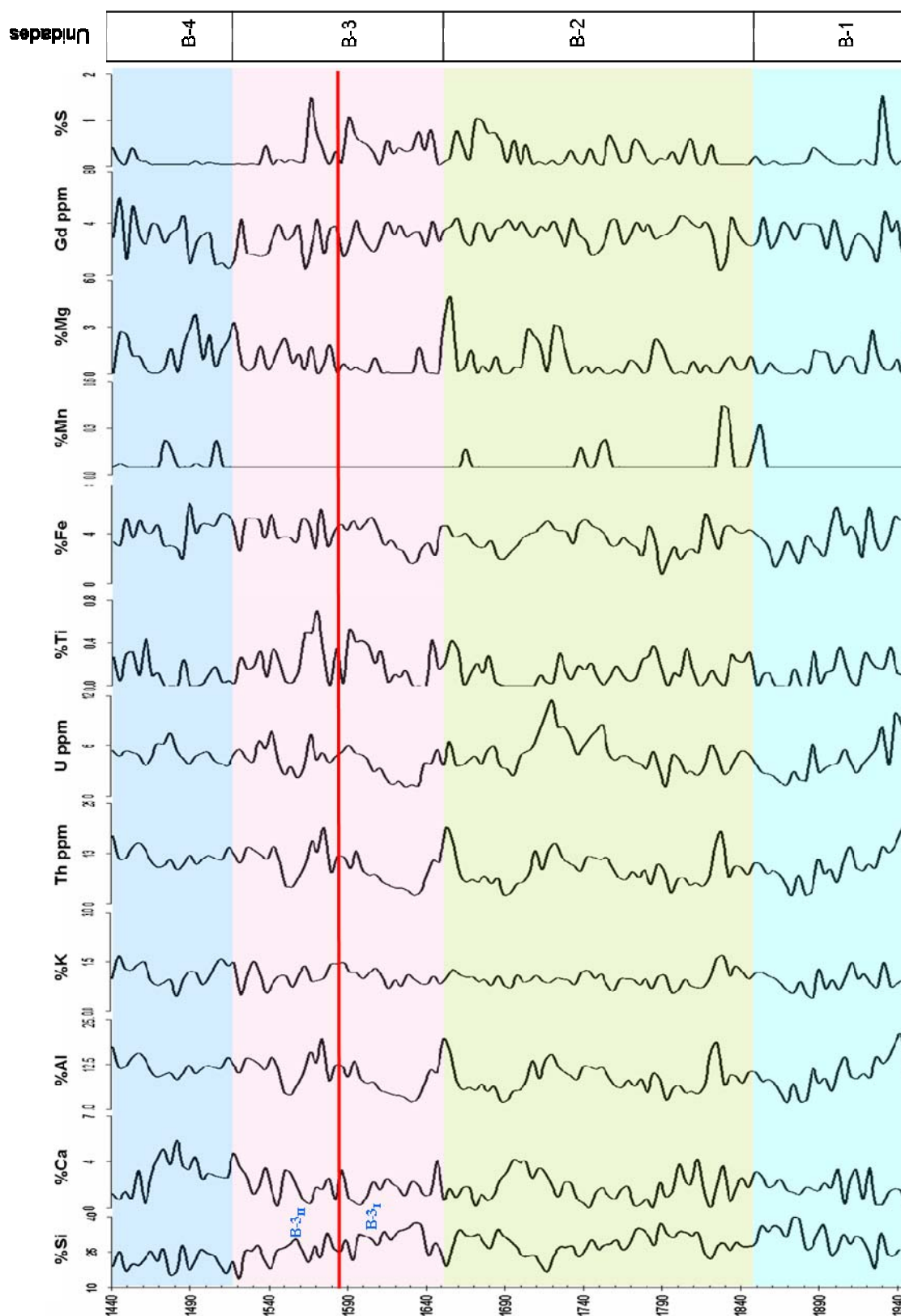


Figura 5.27. Perfiles verticales del pozo B donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies. La línea roja indica la separación en subunidades.

Contrario al comportamiento descrito anteriormente, la curva del elemento Al presenta una tendencia negativa en donde la base de la unidad tiene los valores máximos que luego disminuyen hacia el tope, aunque esta curva presenta el mismo grado de inflexiones que la curva de Si. La curva del Fe presenta la misma conducta del Al, con la tendencia negativa de valores máximo en la base y mínimos hacia el tope. Los promedios del Al y Fe son 7,1% y 2,7% respectivamente.

Las curvas de los elementos Th, K y U presentan comportamientos muy similares Al y Fe, presentando inflexiones de magnitudes moderadas y adquiriendo una tendencia negativa. Entre los elementos mencionados anteriormente, el Th presenta el mayor promedio de los tres con 10 ppm aproximadamente.

Al observar el comportamiento de las curvas para cada elemento dentro de esta unidad se puede inferir que en la parte central aumenta el contenido de arenas mientras que hacia la base y tope aumenta el contenido de material arcilloso.

La relación Si/Al presenta inflexiones de baja magnitud que aumenta en la parte central de la unidad. Los valores que toma esta relación mantienen el mismo comportamiento de inflexiones máximas en la parte media y mínimas en los extremos.

Tabla 5.3. Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo B

		Al % peso	C % peso	Ca % peso	Fe % peso	Gd ppm	Mg % peso	Mn % peso	S % peso	Si % peso	Ti % peso	K % peso	Th ppm	U ppm
B-4	Máximo	12.7	14.2	4.2	5.5	4.9	3.3	0.6	1.0	39.1	0.5	1.5	17	6
	Mínimo	3.2	1.3	0.1	2.1	0.4	0.1	0.1	0.1	13.6	0.0	0.5	4	1
	Promedio	7.1	4.0	1.7	3.7	2.5	0.8	0.1	0.2	28.1	0.2	1.1	8	3
B-3	Máximo	14.1	16.5	3.1	6.1	5.6	2.3	0.1	1.1	37.2	0.5	1.6	19	8
	Mínimo	1.6	0.8	0.2	1.4	0.9	0.1	0.1	0.1	17.7	0.0	0.7	2	1
	Promedio	7.5	7.2	1.4	3.9	2.9	0.7	0.1	0.3	28.0	0.2	1.2	10	4
B-2	Máximo	15.0	12.2	5.7	4.9	5.3	4.0	0.3	0.9	42.5	0.6	1.9	16	6
	Mínimo	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	16.9	0.0	0.6	2	0
	Promedio	5.4	5.2	1.6	2.4	3.3	0.6	0.1	0.4	32.1	0.2	1.1	7	3
B-1	Máximo	11.3	9.6	3.7	4.7	4.8	4.2	1.0	0.5	38.1	0.6	1.7	19	9
	Mínimo	2.1	0.1	0.1	0.2	0.7	0.1	0.1	0.0	19.3	0.0	0.5	2	1
	Promedio	7.1	3.2	1.7	2.7	2.9	0.8	0.1	0.1	29.8	0.1	1.0	10	4

La curva de la relación Th/U presenta inflexiones que van de elevada a baja magnitud, ubicándose hacia la parte basal los valores máximos y hacia el tope van progresivamente disminuyendo, lo que indica un aumento de la oxigenación.

Tabla 5.4. Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo B

		Th/K	Al/K	Si/Al	Th/U
B-4	Máximo	3.9	14.6	3.9	20.5
	Mínimo	1.5	5.0	1.5	6.6
	Promedio	2.5	8.2	2.4	11.2
B-3	Máximo	21.6	14.7	3.7	20.4
	Mínimo	1.6	1.7	1.2	2.3
	Promedio	6.2	6.4	2.4	8.7
B-2	Máximo	20.4	13.9	5.2	18.7
	Mínimo	1.5	2.2	0.7	3.0
	Promedio	5.8	6.3	1.8	8.6
B-1	Máximo	25.0	17.0	4.0	22.8
	Mínimo	1.6	2.8	1.2	4.1
	Promedio	6.8	7.7	2.3	10.6

Las relaciones Al/K y Th/K presentan comportamientos muy similares mostrando un aumento del contenido de arcillas ricas el Al y Th en el tope, el cual disminuye en la base.

Los valores máximos y mínimos, así como los valores promedios, para cada una de las relaciones que se evaluaron para este pozo se encuentran en la tabla 5.4.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad B-1

Para este pozo las variaciones de la pendiente no se reconocen claramente, sólo se pueden distinguir leves cambios, así como marcadores de primer y segundo orden poco pronunciados (Anexos N° 17).

En cuanto al elemento Si, su perfil vertical presenta una pendiente levemente pronunciada indicando que este elemento presenta un aumento. Por su parte, los perfiles de

los elementos Th, U, K, Al y Fe exhiben una pendiente de valores levemente bajos que se pueden adjudicar a mayor contenidos de los mismos.

5.5.2.2. Unidad mayor B-2

Esta unidad estudiada se encuentra definida entre las profundidades de 1845' y 1705' (562,4 – 519,7 m) correspondiente con las muestras B102 –B67 y tiene un espesor de 140' (42,7 m). Para esta unidad las curvas presentan inflexiones que varían de baja a alta magnitud (Anexos N° 9).

La curva de Si en esta unidad presenta inflexiones de baja magnitud, mientras que presenta un cambio de tendencia a la profundidad de 1790' (545,6 m) donde por encima es negativa y por debajo es positiva. El promedio para este elemento es el más alto dentro de todo el pozo con 32% aproximadamente, mostrando un aumento en relación a la unidad infrayacente y suprayacente.

La curva del elemento Al presenta dentro de esta unidad inflexiones de baja magnitud, la cual pasa de valores mínimos en la base de la unidad que van aumentan gradualmente hacia el tope (tendencia positiva). El promedio de este elemento dentro de la unidad se encuentra alrededor del 5%.

La curva del elemento Fe presenta un comportamiento similar al del Si donde internamente en la unidad persisten dos tendencias separadas por la profundidad de 1790' (545,6 m). Por debajo de esta profundidad, la tendencia es negativa y por encima positiva. El promedio de los valores alcanzados es de 2,4% aproximadamente. Las curvas del K, Th y U mantienen la misma tendencia de valores mínimos y poseen la misma inflexión de magnitud alta donde toman valores máximos.

Al observar el comportamiento de las curvas para cada elemento dentro de esta unidad se puede inferir que en la parte central aumenta el contenido de arenas mientras que hacia la base y tope aumenta el contenido de material arcilloso.

La relación Si/Al presenta inflexiones de baja magnitud en la base que luego aumentan hacia el tope, lo que sugiere que hacia la base de la unidad se tiene mayor contenido de material arcilloso mientras que hacia el tope aumenta el contenido de areniscas, específicamente a la profundidad de 1880' (573 m).

La relación Th/U muestra un gran contenido de inflexiones de moderada magnitud que toma valores bajos hacia el tope y luego aumenta en la base, relacionándose con zonas de oxigenación moderada.

Las relaciones Al/K y Th/K muestran un comportamiento similar. Las tendencias de las curvas presentan inflexiones de baja magnitud en la parte superior de la unidad, exceptuando la parte inferior donde existen inflexiones de mayor magnitud relacionadas con el contenido de arcillas ricas en Al y Th, especialmente la caolinita.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad B-2

En los perfiles verticales de esta unidad sólo se observan marcadores de primer orden en elementos como Th, K, U, Ti, S, Mn y Mg (Anexos N° 17).

El perfil del Si tiene una disminución en la pendiente lo cual representa un incremento en su proporción dentro de esta unidad. A diferencia de esto, los elementos Th, K, U, Al y Fe presentan un aumento en la pendiente de los perfiles acumulados, lo cual significa poca variación y posiblemente una escasa presencia de estos elementos dentro de la unidad.

5.5.2.3. Unidad mayor B-3

Esta unidad se encuentra, igualmente como en el pozo anterior, dividida en dos subunidades. La Unidad B-3 tiene un espesor total de 118' (34,1m) y se ubica entre las profundidades de 1653' a 1525' (503,8 – 464,8m) representadas por las muestras B50 y B22 (Anexos N° 9).

Subunidad B-3_I

La subunidad B-3_I para este pozo se define entre las profundidades de 1653' y 1589' (503,8 – 483,1 m). Estos límites corresponden a las muestras B50 – B36 respectivamente y posee un espesor total de 48' (14,6 m). En esta subunidad las inflexiones presentes en las curvas se observan con magnitudes que van de bajas a moderadas.

La curva del Si presenta un comportamiento uniforme para casi toda la subunidad con inflexiones de baja magnitud, exceptuando el intervalo entre 1650' y los 1630' donde posee inflexiones de magnitud alta. En este punto se encuentran los valores mínimos alcanzados por el elemento mientras que para el resto de la subunidad se mantiene en valores máximos. Los valores del elemento Si al aproximarse a los límites disminuyen levemente (tendencia negativa y positiva para la base y tope respectivamente).

La curva de Al presenta una conducta contraria a la mostrada por el Si. Este elemento muestra valores mínimos que van aumentado levemente a medida que se acercan a la base y el tope. Para el intervalo que se mencionó anteriormente (1650' - 1630'), la curva toma valores máximos y presenta inflexiones de alta magnitud a diferencia del resto de inflexiones las cuales son de magnitud baja.

La curva del elemento Fe toma valores que hacia la base son mínimos pero van aumentando progresivamente hasta 1650' (502,9 m) (tendencia positiva) donde alcanza su

valor máximo, para luego disminuir tomando valores mínimos y nuevamente aumentar paulatinamente hasta el tope (tendencia positiva).

La curva del K se presenta con gran cantidad de inflexiones de baja magnitud y la tendencia es positiva que van aumentando gradualmente hacia el tope. En el caso de las curvas del Th y U, se observaron mínimos a lo largo de la subunidad y máximos en el intervalo que se señaló en los elementos anteriores (1650').

Para esta subunidad, la litología asociada a las respuestas de las curvas se relaciona con una zona lutítica hacia sus límites y arenas con alto contenido de matriz en la parte central.

En la relación Si/Al se nota como esta subunidad se encuentra dividida en dos zonas de alto contenido de areniscas separadas entre sí por la presencia de una capa de aproximadamente 20' a la profundidad de 1650' - 1630', donde aumenta el contenido de aluminosilicatos.

La relación Th/U presenta una curva con alto contenido de inflexiones de mediana y alta magnitud, que por encima de los 1650' poseen una tendencia negativa mientras por debajo de esta profundidad es positiva. Todas estas respuestas se pueden asociar con zonas de mayor oxigenación hacia el tope que hacia la base.

Como se ha mencionado anteriormente, las curvas de las relaciones Al/K y Th/K presentan alta correspondencia entre sí, lo que nos permite establecer que el mayor contenido de material arcilloso se encuentra entre las profundidades 1650' – 1630'.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Subunidad B-3_I

En los perfiles de frecuencia acumulada, esta subunidad se caracteriza por un cambio delimitado con marcador primario presente en los elementos Al, Mg, S, Ca, Th, U y K, mientras que en el elemento Si no se puede diferenciar claramente (Anexo N° 17).

Para el perfil del Si el cambio entre la subunidad inferior y la unidad superior no se puede distinguir con claridad ya que este elemento exhibe una pendiente casi constante con leve aumento, lo que sugiere que existe una leve disminución del contenido de este elemento.

Los elementos Al, Th, U, K y Fe presentan una variación en su pendiente que permite inferir que el contenido de estos elementos aumenta en esta unidad.

Subunidad B-3_{II}

Esta subunidad es la de menor espesor en todo el pozo, con apenas 56' (17,1 m) de espesor y se ubica entre las profundidades de 1585' y 1525' (481,9 – 464,8m) cuyos límites son las muestras B37 y B22 respectivamente. La subunidad se caracteriza por presentar un número elevado de inflexiones de moderada a alta magnitud.

Para esta subunidad la curva de Si presenta un mayor número de inflexiones de moderada magnitud. Así mismo presenta una tendencia negativa bien marcada en la cual los valores en la base son máximos y van decreciendo paulatinamente hasta el tope.

La curva de Al presenta inflexiones bajas y moderadas, pasando de valores máximos en la base a valores mínimos hacia el tope de la subunidad (tendencia positiva). En el punto de 1550' (472,4 m) se observa una inflexión de gran magnitud donde toma valores mínimos. Para el elemento Fe, el comportamiento de las inflexiones es diferente ya que su perfil presenta un comportamiento uniforme dentro de la subunidad con una magnitud moderada, mostrando una tendencia levemente positiva.

En los elementos K, Th y U se presenta una conducta donde las inflexiones son de magnitud moderada exceptuando el punto de 1550' (472,4 m) donde se presenta una inflexión de magnitud alta. La tendencia general es positiva donde los valores van de bajos en la base hacia moderados en el tope.

La litología que se estima de las respuestas observadas de las tendencias generales de los perfiles verticales dentro de la subunidad, corresponde a una zona con un alto contenido de material arcilloso que aumentado gradualmente hacia el tope, exceptuando la profundidad de 1550' (472,4 m) donde aumenta el contenido areniscas.

La relación Si/Al dentro de la subunidad se observa con inflexiones de muy baja magnitud exceptuando el pico presentando a la profundidad que se nombró anteriormente (1550') donde aumenta bruscamente, mientras que para el resto de la subunidad los valores son bajos.

Las relaciones de Al/K y Th/K muestran variación en el tipo de arcillas que se presenta en esta zona, ya que exhiben gran número de inflexiones moderadas que solo disminuyen en el intervalo arenoso que se menciona arriba.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Subunidad B-3_{II}

En los perfiles de frecuencia acumulada esta subunidad se muestran el tope y la base de la misma definida por marcadores de primer orden en los siguientes elementos: Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, y Mg, igualmente se presenta un leve cambio de pendiente entre las subunidad y unidad adyacentes (Anexo N° 17).

El elemento Si muestra un comportamiento que pasa de una pendiente baja en la subunidad anterior a una pendiente mayor. En el caso del Th, K, U, Al y Ti ellos exhiben un comportamiento diferente en las pendiente tiende a verticalizarse indicando que el contenido dentro de la subunidad es menor que en la anterior.

5.5.2.4. Unidad mayor B-4

Esta unidad es la ultima que se describe para este pozo, posee un espesor aproximado de 76' (23,2m) entre las profundidades de 1517' - 1441' (462,4 – 439,2 m) los límites corresponde a las muestras B21 y B1 respectivamente. Para esta unidad podemos señalar

que las mayorías de las curvas de los elementos evaluados poseen pocas variaciones en los valores y con inflexiones de baja magnitud (Anexos N° 9).

La curva del elemento Si se observa una tendencia constante a lo largo de la unidad mostrando inflexiones moderadas que se hacen más suaves hacia el tope. Los valores alcanzados por este elemento son bajos en comparación con la unidad anterior. El promedio del Si para esta unidad se encuentra alrededor del 28% (tabla 5.3).

El comportamiento de la curva del Al presenta una inflexión de baja magnitud que se mantiene constante dentro de la unidad y la tendencia son valores mínimos que alcanzan un promedio de 7,1 % (tabla 5.3).

Para la curva del Fe existen variaciones marcadas en la tendencia de los valores. Por debajo de los 1490' se presentan valores máximos y por arriba los valores disminuyen. El promedio para el Fe es aproximadamente un 3,7 % (tabla 5.3).

Las curvas de los elementos Th, K y U en esta ocasión son poco sinuosas, lo que implica que sus valores mantienen una tendencia constante similar entre ellos con inflexiones de poca magnitud.

Según el comportamiento de los elementos químicos, esta unidad se corresponde con una zona donde se presentan lutitas con un contenido importante de Si.

En la relación Si/Al apenas se logra apreciar el límite de esta unidad ya que esta curva se caracteriza por pocas inflexiones de baja magnitud, que demuestra que esta zona es más abundante el contenido de material arcilloso que el contenido de areniscas.

La relación Th/U se presenta con sinuosidad abundante. Algunas inflexiones bien pronunciadas muestran valores máximos mientras que el resto de la unidad son valores mínimos. Las relaciones de Th/K y Al/K se observan bastante similares entre sí con valores bajos en toda la unidad, evidenciando un mayor contenido de arcillas ricas en K.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad B-4

Los perfiles de frecuencia acumulada para esta última unidad muestra marcadores de primer orden en los elementos evaluados como: Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S (Anexo N° 17).

La pendiente del elemento Si tiende dentro de esta unidad a verticalizarse levemente, sugiriendo que la presencia de este elemento se mantiene baja y casi constante en toda la unidad. El Al, Fe, Ti, Th, U y K presentan pendientes menores, sugiriendo que dentro de la unidad el contenido de estos elementos aumenta respecto a la unidad anterior.

5.5.3. Unidades del Pozo C

Para este pozo se obtuvieron 129 mediciones tomadas por la herramienta de espectroscopía elemental con una frecuencia de 4' desde la profundidad de 1833' (558,7 m) hasta 1321' (402,6 m) para un total de 512' (156,1 m). La secuencia estudiada en este pozo se encuentra dividida en 4 unidades mayores (figura 5.28 y Anexos N° 10).

5.5.3.1. Unidad mayor C-1

La primera unidad está ubicada en la base del pozo y tiene un espesor aproximado de 64' (19,5 m). Sus límites se encuentran a las profundidades de 1833' y 1769' (558,7 – 539,2 m), lo que corresponde con las muestras C129 y C113 respectivamente. En los perfiles verticales se puede observar como en la unidad se encuentra limitada en el tope con una gran inflexión que cambia la tendencia general.

La unidad se caracteriza por inflexiones que van de magnitud moderada a baja. Los perfiles verticales se pueden observar en el Anexo N° 10.

Los valores máximos, mínimos y así como el promedio para cada elemento evaluado para esta unidad y para el resto de las unidades definidas a lo largo del pozo, se encuentran en la tabla 5.5.

Aunque esta unidad es de poco espesor, el elemento Si presenta un número considerable de inflexiones las cuales exhiben una magnitud moderada y con una tendencia general negativa, donde adquieren valores máximos hacia la base que luego van disminuyendo paulatinamente hacia el tope. En la tabla 5.5 se observa como el elemento Si presenta para esta unidad un promedio de 32% aproximadamente.

Contrario con este comportamiento, la curva del elemento Al presenta una tendencia positiva en sus valores, tomando hacia el tope de la unidad los máximos que luego van disminuyendo hacia la base. Esta curva presenta el mismo grado de inflexiones que las curva de Si. Respecto al elemento Fe, su curva presenta la misma conducta del Al, con tendencia positiva de valores máximos hacia el tope y mínimos hacia la base. Los promedios del Al y Fe son 6,2% y 2,3% respectivamente.

Las curvas de los elementos Th, K y U presentan comportamientos muy similares a los del Al y Fe, presentando inflexiones de magnitudes moderadas y adquiriendo valores máximos hacia el tope de la unidad y que van disminuyendo hacia la base (tendencia positiva).

Al observar el comportamiento de las curvas para cada elemento dentro la unidad se puede inferir que esta zona está constituida por alto contenido de arcillas que va aumentando hacia el tope de la misma.

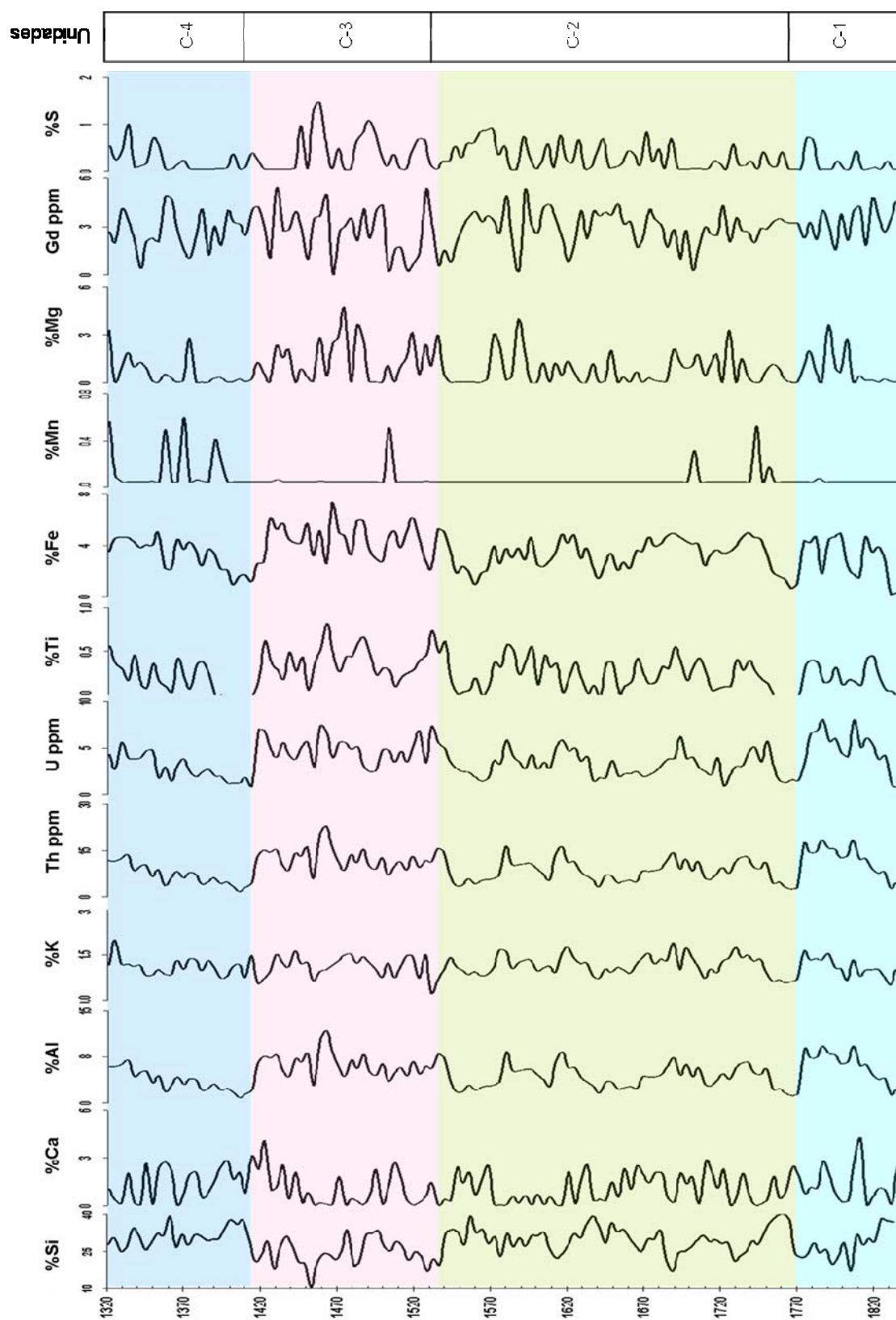


Figura 5.28. Perfiles verticales del pozo C donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies. La línea roja indica la separación en subunidades.

Tabla 5.5. Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el nozo C

		Al % peso	C % peso	Ca % peso	Fe % peso	Gd ppm	Mg % peso	Mn % peso	S % peso	Si % peso	Ti % peso	K % peso	Th ppm	U ppm
C-4	Máximo	12.3	9.7	3.1	5.0	4.9	3.3	0.6	1.0	39.1	0.6	2.0	13.6	5.6
	Mínimo	1.5	0.9	0.1	1.0	0.4	0.1	0.1	0.1	25.0	0.0	0.7	1.7	1.0
	Promedio	6.4	3.3	1.5	3.3	2.7	0.6	0.1	0.2	31.1	0.2	1.1	7.1	2.8
C-3	Máximo	14.2	13.9	2.9	6.0	5.3	3.0	0.1	1.5	34.1	0.7	1.7	15.6	7.8
	Mínimo	2.5	0.1	0.0	2.2	0.5	0.1	0.1	0.1	16.8	0.0	0.2	3.4	1.0
	Promedio	7.3	7.8	1.3	3.9	2.9	0.9	0.1	0.4	27.1	0.3	1.1	9.9	4.2
C-2	Máximo	13.4	11.9	3.9	4.9	5.0	2.9	0.4	0.9	42.5	0.6	1.9	17.9	5.7
	Mínimo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	21.4	0.0	0.7	2.4	0.2
	Promedio	4.6	4.0	1.8	2.2	3.7	0.5	0.1	0.4	33.3	0.1	1.0	6.4	2.4
C-1	Máximo	11.3	12.3	3.7	4.7	4.8	1.5	0.1	0.5	38.8	0.4	1.6	17.4	6.3
	Mínimo	2.0	0.1	0.1	0.2	1.2	0.1	0.1	0.0	25.9	0.0	0.4	2.4	0.8
	Promedio	6.2	3.0	1.5	2.3	3.3	0.4	0.1	0.1	31.6	0.2	1.0	8.5	3.6

La relación de Si/Al presenta pocas inflexiones las cuales tienen baja magnitud lo cual indica un alto contenido de arcillas. Esta conducta presenta una variación hacia la base donde aumenta considerablemente el contenido de arenas.

La curva de la relación Th/U muestra un comportamiento uniforme con la presencia de algunas inflexiones, en su gran mayoría de baja magnitud. Los valores más altos se encuentran en los extremos de esta unidad.

Las relaciones Al/K y Th/K presentan comportamientos muy similares donde cada una evidencia el aumento del contenido de arcillas ricas el Al y Th en la parte central de la unidad.

Los valores máximos y mínimos, así como los valores promedios para cada una de las relaciones que se evaluaron para esta unidad, se encuentran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo C

		Th/K	Al/K	Si/Al	Th/U
C-4	Máximo	12.5	11.1	23.6	5.0
	Mínimo	1.4	1.3	2.2	1.2
	Promedio	6.5	5.8	6.6	2.8
C-3	Máximo	46.1	41.3	4.1	5.1
	Mínimo	5.8	5.2	1.1	1.4
	Promedio	13.2	12.0	2.3	2.7
C-2	Máximo	14.6	13.2	18.7	10.1
	Mínimo	3.2	2.9	1.5	1.3
	Promedio	7.0	6.3	5.3	2.8
C-1	Máximo	20.4	18.3	17.6	5.8
	Mínimo	4.5	4.1	1.5	1.4
	Promedio	10.9	9.8	4.4	2.6

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad C-1

En los perfiles de frecuencia acumulada para esta unidad se presentan marcadores de primer orden en casi todas las curvas específicamente en Al, K, Th, U, Al, Fe, Ti, Mg y S (Anexo N° 18).

En el perfil del Si, la deflexión es leve cambiando la pendiente a valores más altos que evidencian que dentro de esta unidad, el contenido del Si es bajo. En cuanto a los elementos K, Th, U, Al y Fe, el cambio observado se refiere al valor de la pendiente baja, sugiriendo que el contenido de estos elementos es mayor.

5.5.3.2. Unidad mayor C-2

La segunda unidad que se definió para este pozo presenta un espesor de 224' (68,3 m) ubicada entre las profundidades de 1765' a 1541' (636,2 – 469,7 m) limitadas por las

muestras C5 y C112. Para esta unidad todas las curvas se caracterizan por inflexiones que van de magnitud moderada a baja (Anexos N° 10).

El perfil de la curva del Si presenta una tendencia no uniforme, donde a lo largo de la unidad exhiben cambios en la inflexiones tomando valores bajos y altos en distintos puntos, concentrándose los máximos hacia la parte media y los mínimos en los extremos de la misma. El promedio del Si para la unidad es de 33% aproximadamente siendo el más alto dentro del pozo (tabla 5.5.).

Para la curva del Al sucede lo mismo que lo descrito anteriormente para el Si, donde se presentan inflexiones irregulares moderadas y bajas, donde los valores varían de máximos a mínimos en toda la unidad. Los promedios del Al se encuentran alrededor del 6,2%.

En el caso del elemento Fe, el comportamiento es parecido a los elementos anteriores. Las diferencias se presentan únicamente en la magnitud de las inflexiones las cuales cambian de moderadas a altas. Los valores altos se concentran hacia la base y los bajos hacia el tope (exceptuando los últimos 20' donde se observa una disminución). Los valores promedios del Fe son aproximadamente del 2,3% (tabla 5.5).

Los elementos K, Th y U muestran conductas similares entre sí, donde las inflexiones tienen magnitudes moderadas y bajas. En la profundidad de 1710' se observó un punto donde ocurre un cambio en las tendencias de estas curvas; por encima es positiva y por debajo negativa.

La litología estimada de la unidad a partir de las respuestas observadas en la tendencia general de los perfiles corresponde con una zona donde se intercalan estratos arenosos e intervalos con mayor contenido lutítico donde las arenas aumentan levemente hacia el tope.

Para esta unidad, la relación Si/Al exhibe inflexiones con magnitudes altas a bajas. Entre las profundidades 1745' y 1670' presentan los valores bajos mientras que para el resto aumentan; en algunos casos alcanzan picos de valores altos.

La curva de la relación Th/U muestra un comportamiento uniforme de inflexiones de moderada magnitud mientras que los valores se presentan menores por encima de los 1670' (509 m).

Las curvas de las relaciones de Al/K y Th/K presentan inflexiones de muy baja magnitud y valores muy bajos, que no permiten distinguir una tendencia clara del comportamiento de las arcillas para esta unidad.

En la tabla 5.6 se observan los valores máximos, mínimos y los promedios para las relaciones estudiadas en esta unidad.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad C-2

Los perfiles de frecuencia acumulada para esta unidad se caracterizan por un cambio delimitado con marcadores primarios presentes en los elementos Si, Al, Mg, S, Ca, Th, U y K. Los perfiles en su mayoría presentan cambios de pendiente leves dentro de la unidad que están asociados con marcadores secundarios dentro de las curvas (Anexo N° 18).

Para el perfil del Si, el cambio entre unidades inferior y superior se puede distinguir con claridad por los cambios en las pendientes. Dentro de la unidad se observa como tiende a ser mayores los valores del elemento Si.

Los elementos Al, Th, U, K y Fe presentan una variación en su pendiente, tendiendo a verticalizarse lo que hace inferir que el contenido de ellos disminuye hacia el tope.

5.5.3.3. Unidad mayor C-3

La Unidad C-3 posee un espesor de 120' (36,6 m) ubicada entre las profundidades de 1537' y 1417' (468,5 – 431,9 m) representadas por las muestras C55 y C25. La unidad se encuentra caracterizada por una disminución de la magnitud de las inflexiones en casi todas las curvas (Anexos N° 10).

Comparando el comportamiento de la curva del Si, los valores de este elemento se presentan más uniformes que en la unidad anterior y las magnitudes de las inflexiones son moderadas en toda la unidad aunque se hacen más pronunciadas en la parte superior. Su tendencia es negativa donde los valores van disminuyendo progresivamente hacia el tope.

La curva de Al presenta una conducta completamente contraria a la observada con el elemento Si, mostrando inflexiones de magnitudes bajas y donde el contenido aumenta hacia el tope con una tendencia positiva. Para el elemento Fe la conducta es diferente al elemento Al, la curva presenta varias inflexiones de magnitud alta en la cuales se intercambian entre valores máximos a mínimos, mostrando una tendencia positiva que va aumentando levemente hacia el tope.

Para el caso de la curvas de los elementos K, Th y U, estos elementos presentan una actuación similar entre sí, donde las inflexiones presentan magnitudes muy bajas y los valores poseen una tendencia levemente positiva, exceptuando al Th cuya curva no muestra una tendencia clara.

Todas las conductas que toman las curvas dentro de la unidad indican que la litología corresponde a una zona donde el contenido de arcillas va disminuyendo hacia el tope mientras que las arenas aumentan.

En la relación Si/Al se observa una curva suave, sin inflexiones de magnitudes considerables, que permitan definir una tendencia preferencial dentro de esta unidad. Los valores obtenidos se pueden relacionar con el alto contenido de material arcilloso de esta unidad.

En la relación Al/K se muestran valores mínimos que se relacionan con el contenido de minerales de arcillas que poseen bajo contenido en Al. Esto se confirma observando la curva de la relación Th/K, cuyos valores y conducta son muy similares a la relación Al/K.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad C-3

Los perfiles de frecuencia acumulada presentan para esta unidad marcadores de primer orden muy leves en los elementos Si, Mg, Ti, Fe, Al, Th, U y K (Anexo N° 18).

Para el elemento Si se encuentra que la pendiente presenta leve variación, siendo ésta mayor con respecto a la unidad evaluada anteriormente, la cual corresponde con una disminución de la proporción de este elemento dentro de la unidad. Para el resto de los elementos que se mencionó en el párrafo anterior, se encuentra que su pendiente disminuye respecto a la unidad anterior lo cual se asocia a un mayor contenido de los mismos en esta unidad.

5.5.3.4. Unidad mayor C-4

La última unidad de este pozo se encuentra entre las profundidades de 1413' y 1321' (430,7 – 402,6 m) la cual corresponde con las muestras C24 –C1. Esta unidad tiene un espesor de 92' (28 m). Las curvas dentro de esta unidad presentan inflexiones que varían de baja a moderada magnitud (Anexos N° 10).

La curva de Si se caracteriza por inflexiones de baja magnitud donde la tendencia es negativa pasando progresivamente de valores máximos en la base a valores mínimos hacia el tope, manteniendo inflexiones suaves.

El elemento Al muestra dentro esta unidad inflexiones de baja magnitud, pasando gradualmente de valores mínimos en la base de la unidad a valores máximos hacia el tope. Mostrando una tendencia positiva.

El comportamiento del Fe es un poco diferente al del Al mostrado magnitudes medias y manteniendo la misma tendencia positiva en casi toda la unidad donde los valores alcanzan mínimos en la base y máximos en el tope.

Las curvas del K, Th y U mantienen conductas similares entre ellas, mostrando inflexiones de baja magnitud y tendencia positiva con valores mínimos en la base y mayores en el tope.

Los perfiles verticales de los elemento permiten establecer para esta unidad una litología mayormente arenosa, pero donde el contenido de arcillas va aumentando paulatinamente hacia el tope.

En la relación Si/Al se observa claramente como es la distribución del las areniscas dentro de la unidad, los cuales se ubican en la parte basal y van disminuyendo progresivamente hasta llegar al tope del pozo.

La curva de la relación Th/U muestra gran contenido de inflexiones de mediana magnitud que presenta una tendencia uniforme a lo largo de la unidad.

Las relaciones Al/K y Th/K muestra entre ellas un comportamiento análogo en la tendencia de las curva, tomando inflexiones de baja magnitud en todo la unidad, lo que se relacionan con arcillas ricas en K.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad C-4

Esta última unidad se caracteriza en los perfiles de frecuencia acumulada por marcadores de primer orden presente en los elementos Si, Al, Ca, Th, U, K y Fe, conjuntamente con cambios de pendientes en la mayoría de los elementos evaluados (Anexo N° 18).

Para el elemento Si se tiene que su pendiente disminuye indicando que su contenido aumento dentro de la unidad. En cuanto a los elementos Al, Th, U, K y Fe, estos muestran una pronunciada variación en su tendencia pasando de una pendiente baja a una pendiente mayor lo que hace inferir que el contenido de ellos disminuye.

5.5.4. Unidades del Pozo D

En este pozo se tomaron 126 mediciones adquiridas por la herramienta de espectroscopía elemental aplicando una frecuencia de 4' desde la profundidad de 1739' (530 m) hasta 1239' (377,6 m) lo que implica un total de 500' (152,4 m), el cual se encuentra dividido en 4 unidades mayores (Anexos N° 11).

5.5.4.1. Unidad mayor D-1

Para la primera unidad se tiene un espesor aproximado de 60' (18,3 m) limitadas por las profundidades de 1739' y 1679' (530 – 511,8 m), lo que corresponde a las muestras A126 y a la A111 respectivamente. A pesar que esta unidad posee poco espesor, en los perfiles verticales se puede observar como se presenta un número considerable de inflexiones que van de altas a medias (Anexo N° 11).

Los valores máximos, mínimos y así como el promedio para cada elemento evaluado para esta unidad y para el resto de las unidades definidas a lo largo del pozo D, se encuentran en la tabla 5.7.

La característica de la curva del Si es que presenta inflexiones de alta magnitud, dentro de ella, mostrando dos tendencias bien marcadas que se encuentran delimitadas a la profundidad de 1708' (520,6 m) por debajo de este punto la tendencia es negativa, donde los valores en la base van disminuyendo paulatinamente hacia el tope y por encima cambia la tendencia bruscamente a positiva y los valores son máximos nuevamente. En la tabla 5.7 se observa el promedio para el Si el cual es de 27,9%.

El comportamiento del Al es completamente contrario al del Si, mostrando a la profundidad de 1708' (520,6 m) un cambio en las tendencia por encima los valores disminuyen repentinamente y por debajo aumentan, lo que se puede clasificar como tendencias positiva y negativa respectivamente. El promedio en la unidad es de 7%.

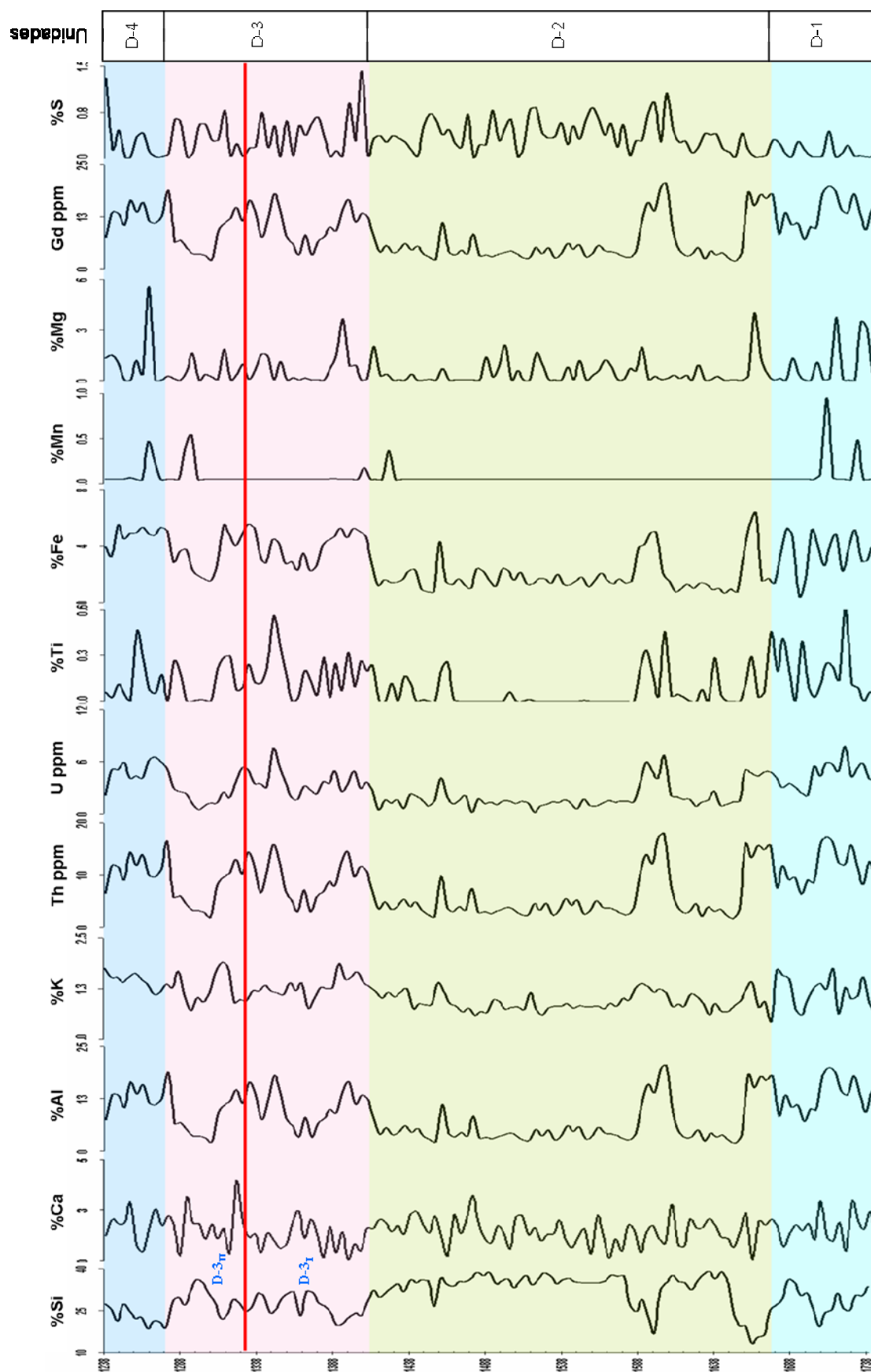


Figura 5.29. Perfiles verticales del pozo D donde se muestra las cuatro unidades definidas las profundidades se encuentran en pies. La línea roja indica la separación en subunidades.

Para la curva del elemento Fe la conducta es diferente. En esta unidad se caracteriza por múltiples inflexiones de alta magnitud donde hacen fluctuaciones de valores máximos y mínimos que no siguen ninguna tendencia preferencial. Los promedios de estos elementos son de 2%.

Las curvas de los elementos Th y U muestran el mismo cambio de tendencia a los 1708' (520,6 m) donde por encima la tendencia es positiva y por debajo negativa. Las curvas nos muestran como la litología correspondiente a esta tendencia se relaciona con una zona arcillosa por debajo de los 1708' (520,6 m) y por encima el mayor contenido es arenoso.

La relación de Si/Al presenta inflexiones de muy baja magnitud cuya tendencia muestra que los valores aumentan levemente hacia el tope, lo cual indica un aumento de areniscas.

En la curva de la relación Th/U se observó comportamiento uniforme con inflexiones en su gran mayoría de moderada magnitud, las cuales impiden reconocer una tendencia bien definida.

Tabla 5.7. Valores máximos, mínimos y promedios de los elementos presentes en las cuatro unidades definidas para el pozo D

		Al % peso	C % peso	Ca % peso	Fe % peso	Gd ppm	Mg % peso	Mn % peso	S % peso	Si % peso	Ti % peso	K % peso	Th ppm	U ppm
D-4	Máximo	10.4	3.9	3.6	3.4	4.7	5.6	0.5	1.3	27.5	0.5	1.7	16	7
	Mínimo	4.2	0.7	0.5	2.1	0.7	0.1	0.1	0.1	18.6	0.0	1.1	7	2
	Promedio	7.3	2.3	2.2	3.0	2.4	1.1	0.1	0.3	22.8	0.1	1.4	11	5
D-3	Máximo	11.4	13.4	4.9	3.7	5.7	2.4	0.5	1.4	39.3	0.6	1.7	17	8
	Mínimo	0.6	0.7	0.1	0.9	0.3	0.1	0.1	0.1	20.5	0.0	0.7	3	1
	Promedio	5.8	7.6	1.8	2.5	3.0	0.6	0.1	0.4	28.4	0.2	1.2	9	3
D-2	Máximo	11.4	28.6	4.0	3.9	5.0	4.0	0.4	1.1	42.5	0.5	1.7	18	7
	Mínimo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.0	0.1	0.0	13.2	0.0	0.5	2	0
	Promedio	3.8	5.8	1.8	1.3	3.6	0.4	0.1	0.4	33.1	0.1	1.0	6	2
D-1	Máximo	11.0	8.1	3.7	3.5	4.7	4.2	1.0	0.5	36.1	0.6	1.7	23	10
	Mínimo	1.8	0.1	0.3	0.3	0.7	0.1	0.1	0.0	19.3	0.0	0.6	3	2
	Promedio	7.4	2.0	1.9	2.4	2.6	1.2	0.1	0.2	27.9	0.2	1.2	13	5

Las relaciones Al/K y Th/K presentan comportamientos muy similares donde existe un aumento del contenido de arcillas ricas el Al y Th en a lo largo de toda la unidad.

Los valores máximos y mínimos así como los valores promedios para cada una de las relaciones que se evaluaron para el pozo D se encuentran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Valores máximos, mínimos y promedios de las relaciones planteadas para las cuatro unidades definidas en el pozo D

		Th/K	Al/K	Si/Al	Th/U
D-4	Máximo	12.1	7.7	6.6	3.5
	Mínimo	3.8	2.4	1.8	1.5
	Promedio	8.1	5.2	3.4	2.4
D-3	Máximo	15.3	9.6	27.0	6.4
	Mínimo	2.4	0.5	2.2	1.1
	Promedio	7.7	4.7	7.7	2.9
D-2	Máximo	18.7	11.8	36.9	56.7
	Mínimo	2.0	1.2	1.4	1.2
	Promedio	5.8	3.7	14.6	4.2
D-1	Máximo	19.1	12.0	18.7	4.2
	Mínimo	4.6	2.9	1.8	1.4
	Promedio	11.4	6.6	5.2	2.6

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad D-1

La Unidad D-1 en los perfiles de frecuencia acumulada evaluados posee marcadores de primer orden en la mayoría de los elementos como son Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S. (Anexo N° 19)

El Si se comporta con una pendiente con gran verticalidad indicando que este elemento se mantiene bajo en toda la unidad. El Al, Fe, Th, U y K presentan una conducta diferente debido a que sus pendientes generales son bajas, indicando que dentro de la unidad el contenido de estos elementos aumenta hacia el tope.

5.5.4.2. Unidad mayor D-2

La segunda unidad definida para este pozo se encuentra localizada entre las profundidades de 1675' y 1415' (510,5 – 431,3 m) y los límites corresponden con las muestras A110 y A45. Esta unidad tiene un espesor total de 260' (79,2 m) (Anexos N° 11).

La curva del elemento Si presentan un número de inflexiones de moderada magnitud a lo largo de la unidad. La tendencia general es positiva pasando a valores máximos hacia el tope que se mantienen constantes en toda la unidad; las únicas variaciones se observan en los intervalos de 1608'–1578' y 1675'–1650' donde se muestran valores bajos de Si. El promedio de este elemento en esta unidad se encuentra alrededor de 33% aproximadamente representando los valores más altos observados en el pozo.

La curva de Al muestra inflexiones de baja magnitud, presentando valores mínimos en toda la unidad, exceptuando los intervalos que se mencionaron en el párrafo anterior (1608'–1578' y 1675'–1650') donde se observaron inflexiones pronunciadas tomando valores máximos. El elemento Fe presenta la misma tendencia de la curva del Al caracterizado por valores mínimos e inflexiones de baja magnitud. Los promedios para los elementos Al y Fe son de 3,4 y 1,2% respectivamente.

Para las curvas de Th, K y U el comportamiento es igual a los elementos descritos anteriormente, con inflexiones de magnitudes bajas y valores bajos a lo largo de la unidad; en los intervalos 1608'–1578' y 1675'–1650' se reconocieron los valores máximos de estos elementos en esta unidad.

Basado en el comportamiento de las curvas, la litología de esta unidad corresponde con una zona arenosa bastante limpia que presenta intervalos lutíticos a las profundidades de 1608'–1578' y 1675'–1650'.

La curva de la relación Si/Al muestra un gran número de inflexiones de magnitud alta que evidencian un aumento del contenido de areniscas en casi toda la unidad; sólo disminuye en los intervalos lutíticos mencionados anteriormente.

La relación de Al/K muestra inflexiones de magnitud baja dentro de toda la unidad y mantiene en promedio valores bajos. Al observar la relación Th/K podemos ver igualmente la misma tendencia, con valores bajos en la unidad exceptuando los intervalos lutíticos.

La relación Th/U mantiene en general valores bajos en toda la unidad, sólo se pueden observar variaciones leves en la parte central y superior de la misma donde toman valores altos.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad D-2

Los perfiles de frecuencia acumulada para la segunda unidad de este pozo y la de mayor tamaño, muestran marcadores de primer orden en los siguientes elementos Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S (Anexo N° 19).

El elemento Si se muestra con una pendiente promedio de menor valor indicando que este elemento aumenta dentro de la unidad. En cuanto a los elementos Al, Fe, Th, U y K, sus perfiles tienden a verticalizarse lo que indica sus valores son generalmente menores.

5.5.4.3. Unidad mayor D-3

Esta unidad tiene un espesor total de 128' (39 m) y está ubicada entre las profundidades de 1411' y 1283' (430,1–391 m) representadas por las muestras D44 y D12 (Anexos N° 11). La Unidad D-3 ha sido dividida en dos subunidades que se describen a continuación:

Subunidad D-3_i

Esta subunidad posee un espesor de 76' (23,2 m) y está ubicada entre las profundidades de 1411' y 1335' (430.1–406 m) representadas por las muestras D44 y D25. Esta subunidad se encuentra caracterizada por una disminución de la magnitud de las inflexiones en casi todas las curvas respecto a la Unidad D-2.

El elemento Si presenta inflexiones de magnitud moderada y una tendencia donde levemente aumentan los valores en la parte central y hacia los extremos de la subunidad disminuyen.

La curva de Al presenta una conducta contraria a la mostrada por el elemento Si, teniendo valores máximos hacia los límites y mínimos en la parte central de la unidad con presencia de inflexiones que poseen magnitudes bajas. Para el elemento Fe la conducta es diferente, la curva presenta a la profundidad de 1378' (420 m) un cambio en la tendencia, por debajo de esta profundidad los valores son máximos y constantes mientras que por encima los valores tienen una tendencia positiva.

Para el caso de las curvas de los elementos K, Th y U, éstas presentan un comportamiento similar entre sí, donde las inflexiones presentan magnitudes moderada a bajas y la tendencia en los valores es mínima en la parte central y en los extremos se consiguen valores máximos.

El comportamiento que toman estas curvas evidencian que la litología corresponde a una zona donde el contenido de arenas es elevado en la parte media de la subunidad pero que disminuye hacia el tope y base de la misma.

En la relación Si/Al se observa claramente la tendencia expuesta en el párrafo anterior, donde el contenido de arenas aumenta en la parte central ya que en ella se encuentran los

valores máximos de esta curva los cuales van disminuyendo paulatinamente hacia los extremos de la subunidad.

La relación Al/K muestra una tendencia negativa hasta la profundidad de 1360' (414,5 m) donde cambia a valores máximos lo que se correlaciona con el contenido de minerales de arcillas con altos contenido en Al, esto se confirma observando la curva de la relación Th/K que los valores y conducta son muy similares.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Subunidad D-3_I

La subunidad D-3 de este pozo presenta marcadores de primer orden en los siguientes elementos Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe, Ti, Mg y S (Anexo N° 19).

El elemento Si para esta subunidad presenta en su pendiente un aumento tendiendo a verticalizarse lo que se correlaciona con una disminución en la presencia de este elemento. Para los demás elementos Al, Fe, Th, U y K, los perfiles muestran una disminución de su pendiente que está asociada con el aumento en la presencia de estos elementos.

Subunidades D-3_{II}

Esta subunidad estudiada se encuentra definida entre las profundidades de 1331' y 1283' (405,7 – 391,1 m) y corresponde con las muestras D24 –D12. Tiene un espesor de 48' (14,6 m). Para esta subunidad, las curvas presentan inflexiones que varían de baja a alta magnitud.

La curva de Si muestra un comportamiento desigual dentro de la subunidad ya que a la profundidad de 1318' (401,7 m) presenta un cambio en la tendencia de la curva; por encima de esta profundidad los valores del Si son máximos y por debajo disminuyen. Las magnitudes de las inflexiones son bajas.

Por su parte, la curva del elemento Al, presenta inflexiones de baja magnitud y tiene un comportamiento inverso al Si. La curva del elemento Fe presenta una conducta igual al del Al, mostrando valores mínimos por encima de 1318' mientras que los valores máximos están por debajo. Las curvas de los elementos K, Th y U presentan esta misma tendencia.

Al observar el comportamiento de las curvas para cada elemento en esta subunidad se puede inferir que en la parte superior (sobre 1318') aumenta el contenido de arenas mientras que hacia la base aumenta el contenido de material arcilloso.

La relación Si/Al presentan inflexiones de alta magnitud hacia el tope de la subunidad donde aumenta los valores, lo que sugiere que hacia la base de la subunidad se tiene mayor contenido de material arcilloso mientras que hacia el tope aumenta el contenido de arenas.

La curva de la relación Th/U muestra gran contenido de inflexiones de moderada magnitud, tomando valores altos en casi toda la subunidad lo cual se relaciona con zonas de baja oxigenación.

En las relaciones Al/K y Th/K se observa un comportamiento similar en la tendencia de las curvas, presentando inflexiones de baja magnitud conjuntamente con valores bajos. Esto se correlaciona con arcillas ricas en Al y Th tipo caolinita

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Subunidad D-3_{II}

Los perfiles de frecuencia acumulada para esta subunidad evidencian la presencia de marcadores de primer orden en los siguientes elementos: Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe y Ti (Anexo N° 19).

El perfil de frecuencia acumulada del Si muestra que la pendiente disminuye su valor verticalmente indicando que el contenido de este elemento aumenta hacia el tope de esta subunidad. Respecto a los elementos Al, Fe, Th, U y K, sus perfiles acumulados presentan un aumento en su pendiente que señala una disminución en el contenido de los mismos.

5.5.4.4. Unidad mayor D-4

La última unidad estudiada para este pozo D se define entre las profundidades de 1279' y 1239' (389,8 – 377,6 m) las cuales corresponden con las muestras D11 –D1 respectivamente. La unidad D-4 posee un espesor total de 40' (12,2 m), y en esta unidad las inflexiones de las curvas presentan magnitudes que van de altas a bajas (Anexos N° 11).

Esta unidad corresponde con un pequeño espesor de poco más de 12 m donde la curva de Si presenta un comportamiento uniforme de tendencia positiva con inflexiones de baja magnitud. El promedio de este elemento para esta unidad se encuentra alrededor de 23% aproximadamente.

La curva del Al presenta una conducta contraria a la mostrada por el Si, con un comportamiento de tendencia negativa cuyos valores máximos van disminuyendo levemente a medida que se acercan al tope. El Al presenta valores promedio de 7,3%.

La curva del elemento Fe presenta una tendencia levemente positiva y las inflexiones son de magnitud baja. El promedio del Fe en esta unidad es de 3%.

La curva del K se presenta con inflexiones de baja magnitud y la tendencia de los valores es positiva. En el caso de las curvas de Th y U, éstas presentan una tendencia negativa con inflexiones de baja magnitud.

Para esta unidad la litología asociada a las respuestas de las curvas se relaciona con una zona arenosa que en la base presenta un contenido apreciable de arcillas.

En la relación Si/Al no se observan inflexiones y sus valores son muy bajos; esto se podría asociar a contenido de material arcilloso presente.

Las relaciones Al/K y Th/K presentan valores altos con tendencia positiva y las inflexiones en estas curvas son de baja magnitud.

Análisis del perfil de la frecuencia acumulada para la Unidad D-4

En la última unidad estudiada en este pozo los perfiles de frecuencia acumulada muestran marcadores de primer orden en los siguientes elementos: Si, Al, Ca, Th, K, U, Fe y Ti (Anexo N° 19).

La pendiente del Si muestra un aumento es su valor indicando que el contenido de este elemento disminuye en esta unidad respecto a la anterior. Las curvas de los elementos Al, Fe, Th, U y K presentan mayor variación en la tendencia de su pendiente, las cuales adquieren valores menores que indican que el contenido de estos elementos es mayor respecto a la unidad anterior.

5.6. Análisis Estadísticas Univariantes

5.6.1 Histogramas de frecuencia químicos

Para una visión general de los datos químicos suministrados por la herramienta de espectroscopía elemental, se representan a continuación histogramas y polígonos de frecuencias para cada pozo estudiado (figura 5.26 hasta 5.29). Se construyeron histogramas de frecuencia con los datos cuantitativos de cada unidad con el fin de comparar y establecer características resaltantes entre los elementos que permitan definir a cada pozo.

En los histogramas el área de cada rectángulo es igual a la frecuencia relativa de la correspondiente clase, debido a que el tamaño del rectángulo nos refleja la proporción o porcentaje de datos contenidos en esa clase. Además nos permite realizar comparación de histogramas para determinar correspondencia entre la distribución de los datos de la misma naturaleza (ARMAS 1998).

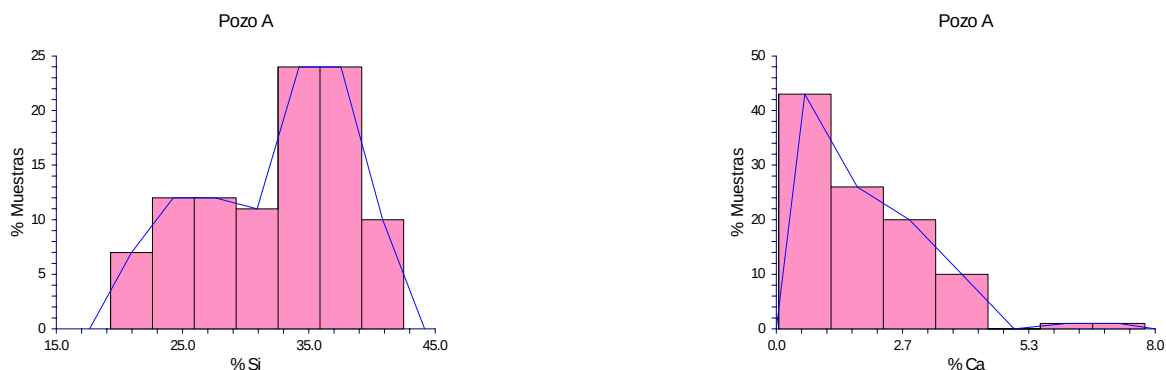


Figura 5.30. Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo A

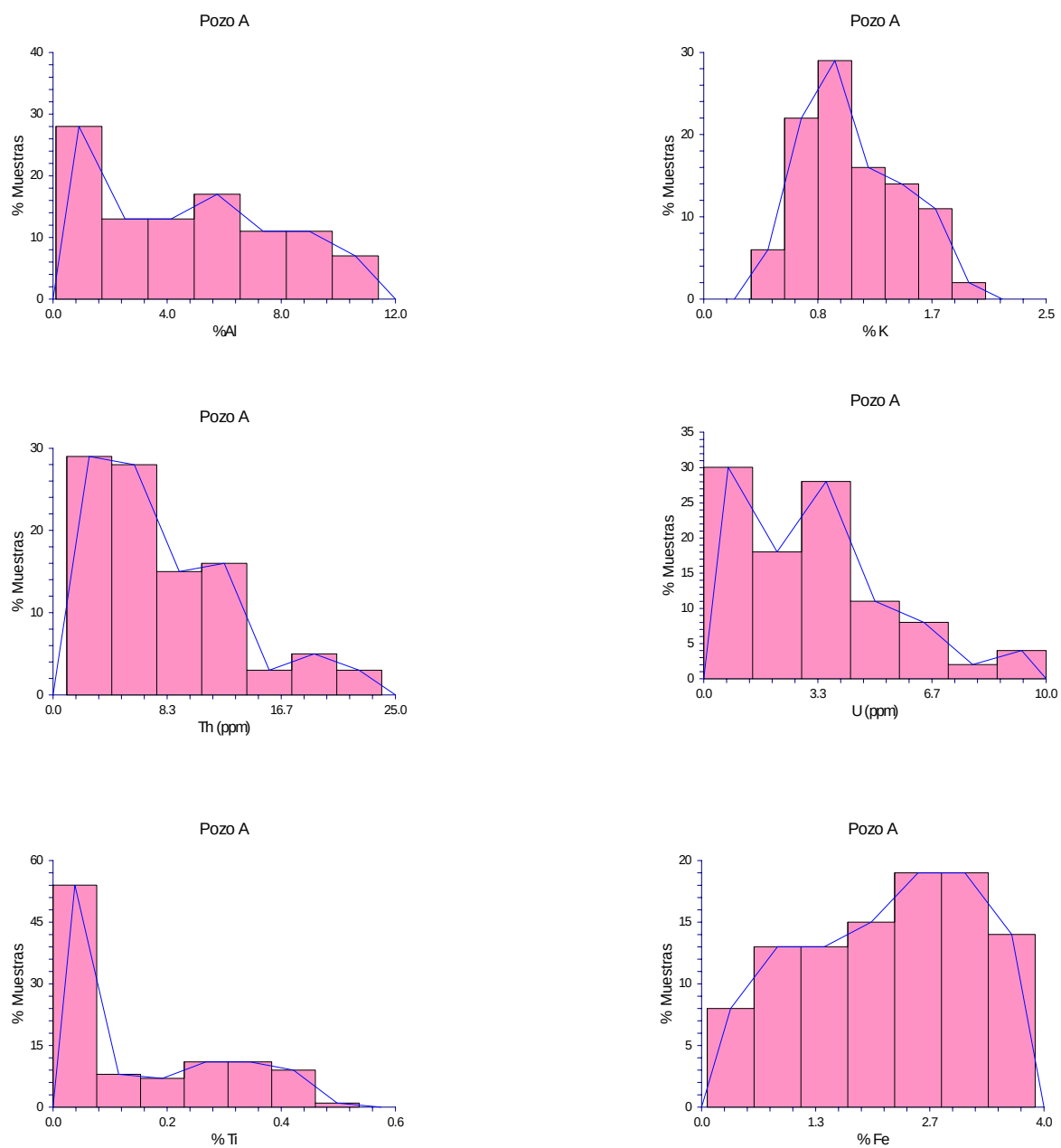


Figura 5.30. (Continuación).

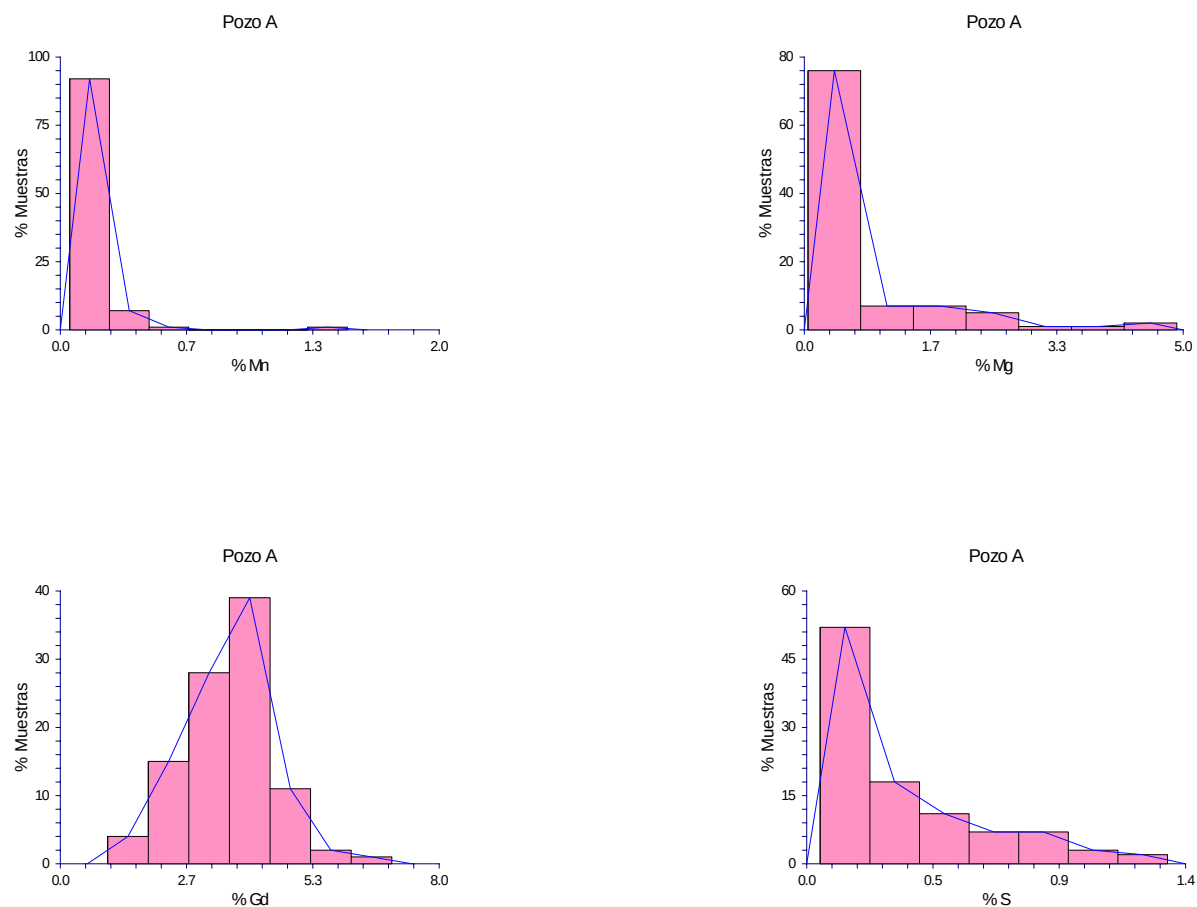


Figura 5.30. (Continuación).

Tabla 5.9. Análisis de los Histograma del Pozo A.

Elemento	Moda	Carácter de la curva
Si	bimodal	El principal pico concentra el 25% de las muestras con un 35% y 38% en peso del elemento, el segundo reúne el 13% de las muestras con un 25% y 28% en peso del elemento.
Al	bimodal	El principal pico concentra el 28% de las muestras con un 0.8% en peso del elemento, el segundo reúne el 18% de las muestras con un 6% en peso.
Ca	unimodal	Con un polígono asimétrico positivo, el pico se encuentra en el valor de 0,5% en peso del elemento, con un 43% de las muestras.
Fe	unimodal	Con un polígono asimétrico levemente negativo, el pico se encuentra en el valor de 3,1% en peso del elemento, con un 19% de las muestras.
K	unimodal	Con un polígono asimétrico positivo, el pico se encuentra en el valor de 9,5% en peso del elemento, con un 30% de las muestras.
U	bimodal	El principal pico concentra el 30% de las muestras con 1 ppm del elemento, el segundo reúne un poco menos del 29% de las muestras con 3ppm.
Th	unimodal	El principal pico concentra casi el 30% de las muestras con 3 ppm del elemento mostrando un sesgo positivo.
Gd	unimodal	El principal pico concentra casi el 40% de las muestras con 4 ppm del elemento mostrando un sesgo positivo.
Mn	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne más del 90% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.
Mg	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 76% de las muestras en el valor de 0,3% en peso del elemento.
Ti	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne el 54% de las muestras en con valores menores al 0.1% en peso.
S	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne casi el 50% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.

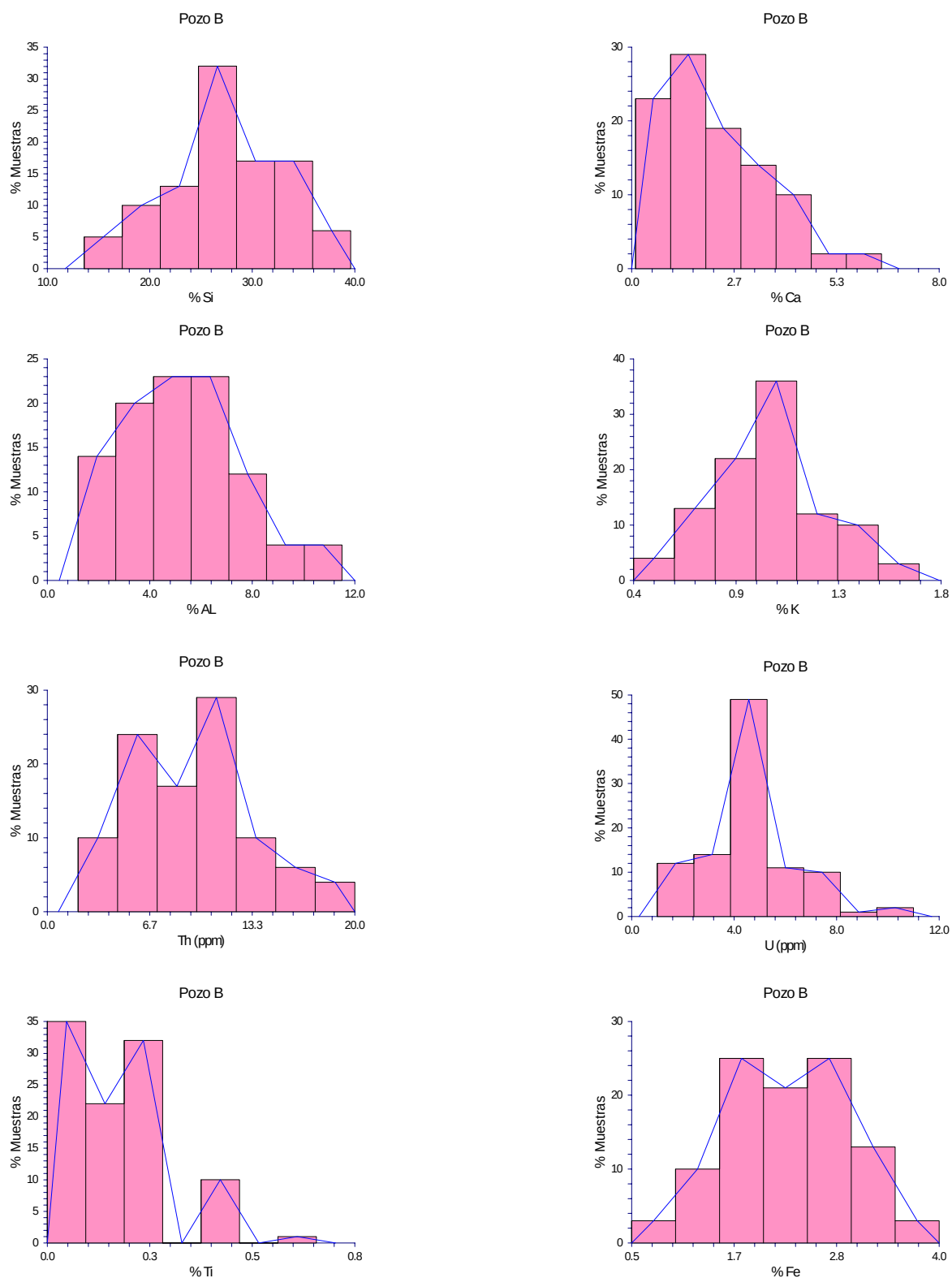


Figura 5.31. Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo B

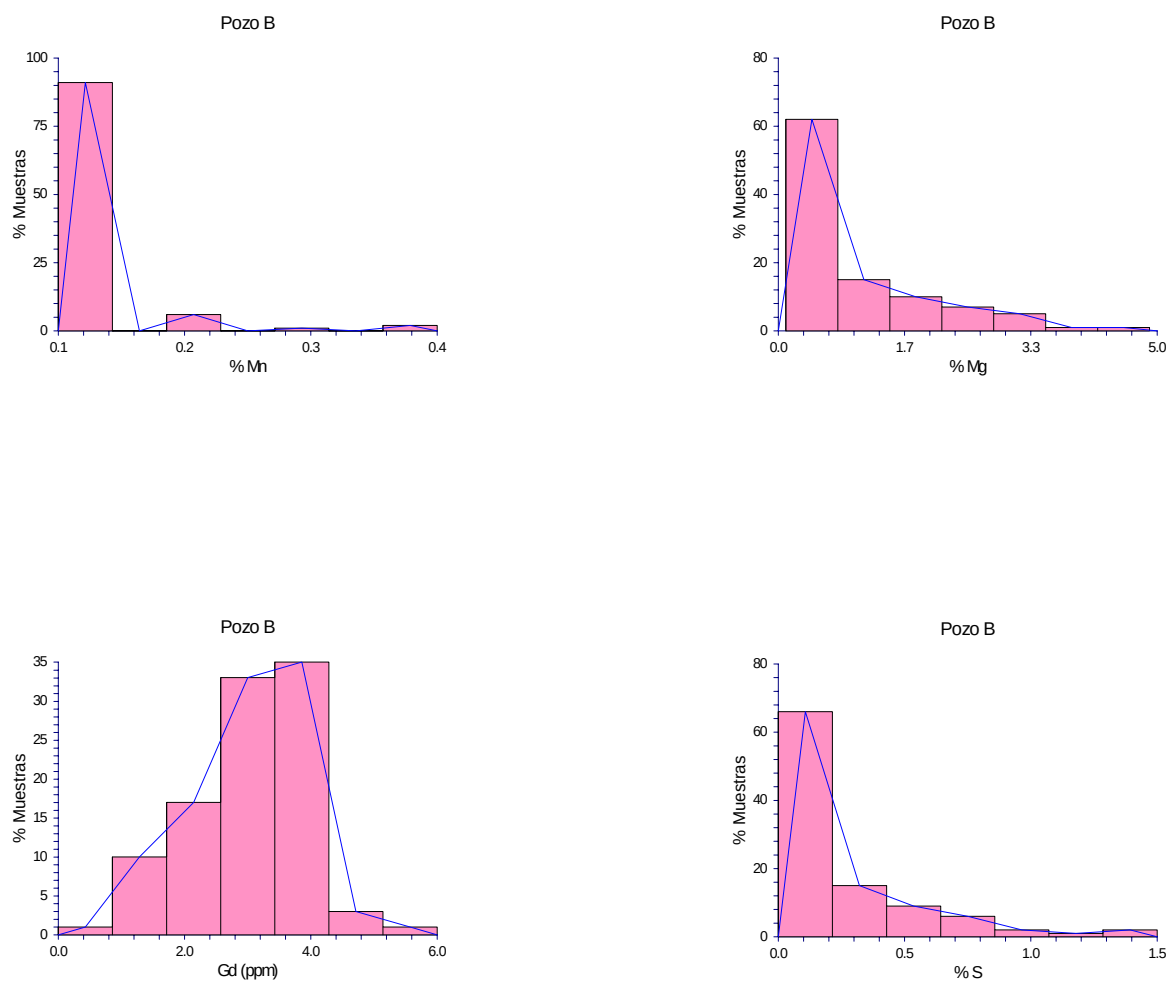
**Figura 5.31.** (Continuación)

Tabla 5.10. Análisis de los Histograma del Pozo B.

Elemento	Moda	Carácter de la curva
Si	unimodal	El principal pico concentra el 33% de las muestras con un 26% en peso del elemento, mostrando un leve sesgo negativo.
Al	unimodal	El principal pico concentra el 24% de las muestras con un 5% y 7% en peso del elemento, mostrando un sesgo levemente positivo.
Ca	unimodal	Con un polígono asimétrico con sesgo positivo, el pico se encuentra en el valor de 1,4% en peso del elemento, con el 30% de las muestras.
Fe	bimodal	Ambos picos con un 25% de las muestras y en los valores de 1,8% y 2,8% en peso del elemento.
K	unimodal	Con un polígono asimétrico con sesgo levemente negativo, el pico se encuentra en el valor de 1,1% en peso del elemento, con un 37% de las muestras.
U	unimodal	El pico de mayor magnitud concentra el 50% de las muestras con 5ppm del elemento con un sesgo positivo.
Th	bimodal	El principal pico concentra el 30% de las muestras con un 11ppm del elemento, el segundo reúne el 24% de las muestras con un 6ppm.
Gd	unimodal	Presenta un sesgo negativo, el pico más alto reúne el 35% de las muestras en el valor de 4ppm del elemento.
Mn	unimodal	Presenta un sesgo positivo, pico más alto reúne casi el 90% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.
Mg	unimodal	Presenta un sesgo positivo, pico más alto reúne 62% de las muestras en el valor de 0,5% en peso del elemento.
Ti	multimodal	El pico mayor reúne aproximadamente 35% de las muestras en valores menores al 0,1% en peso, el segundo pico representa el 33% de las muestras ubicados en el valor de 0,3% y el tercer pico se encuentra representando el 0,4% en peso del elemento.
S	unimodal	Presenta un sesgo positivo, pico más alto reúne casi el 63% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.

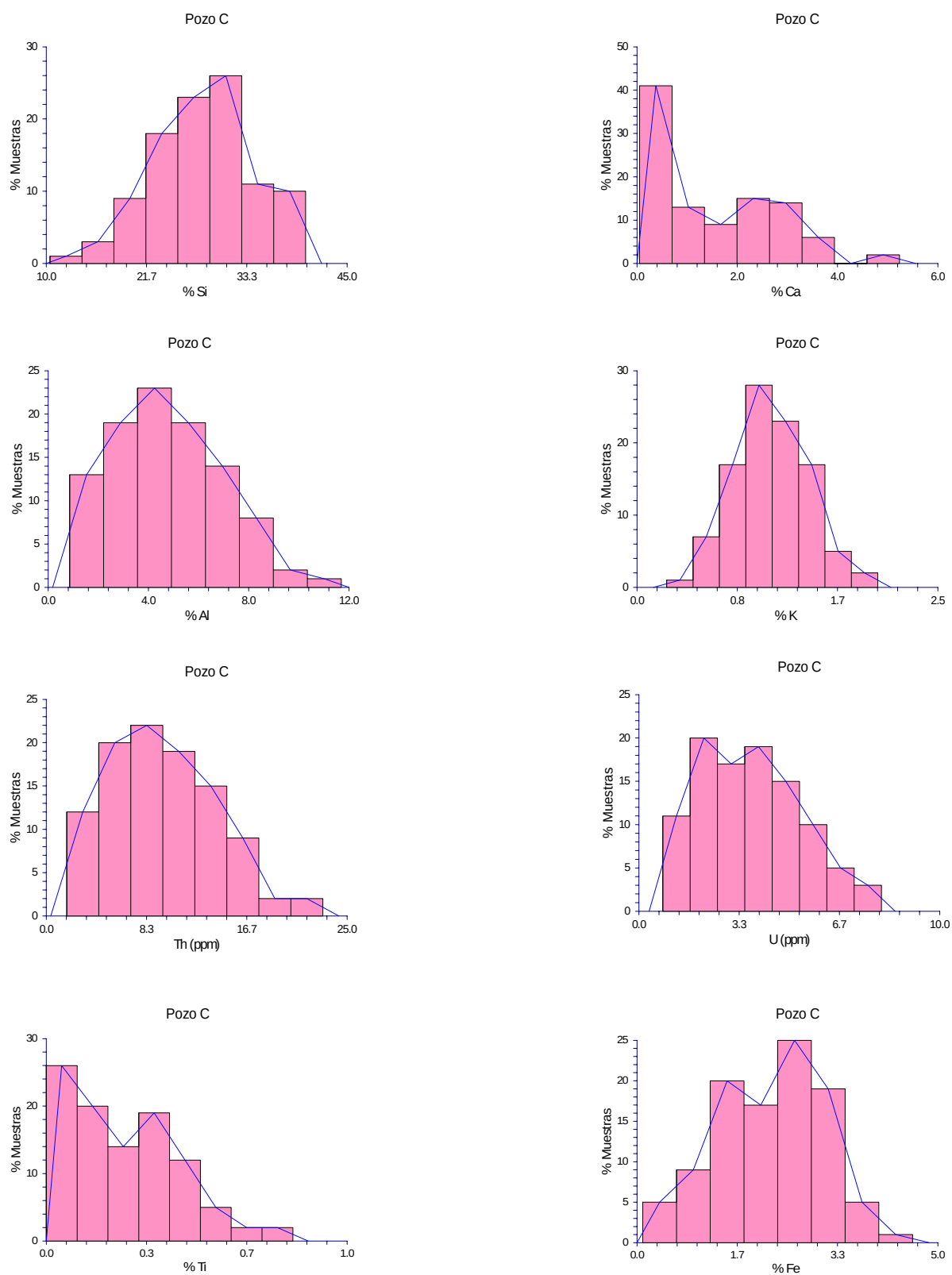


Figura 5.32. Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo C

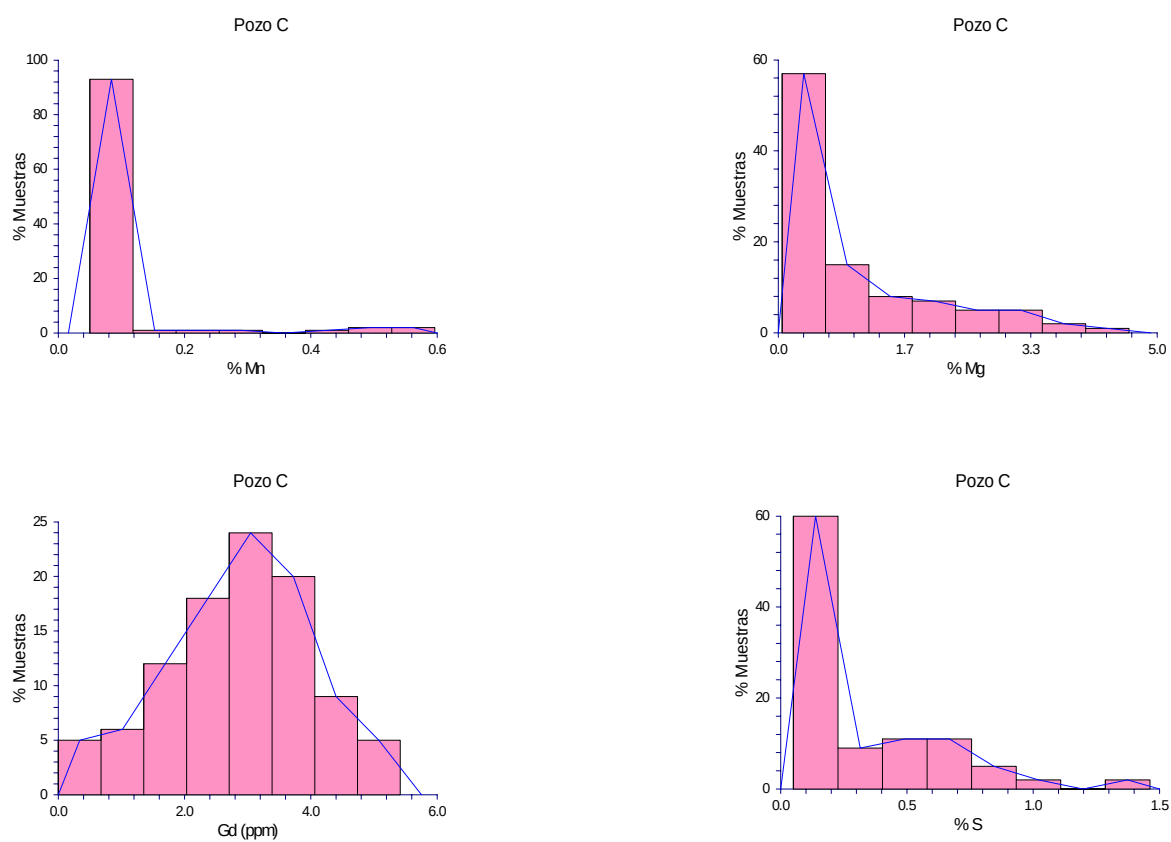
**Figura 5.32. (Continuación)**

Tabla 5.11. Análisis de los Histograma del Pozo C.

Elemento	Moda	Carácter de la curva
Si	unimodal	El principal pico concentra el 26% de las muestras con un 33% en peso del elemento, mostrando un sesgo negativo.
Al	unimodal	El principal pico concentra el 24% de las muestras con un 4,5% en peso del elemento, mostrando un sesgo positivo.
Ca	bimodal	El pico mayor representa el 40% de las muestras y se encuentran en el valor de 0,4% y el segundo reúne el 16% de las muestras con un 2,4% en peso del elemento.
Fe	bimodal	El pico mayor representa el 25% de las muestras y se encuentran en el valor de 2,6% y el segundo reúne el 20% de las muestras con un 1,5% en peso del elemento.
K	unimodal	El principal pico concentra el 28% de las muestras con un 1% en peso del elemento, mostrando un polígono simétrico.
U	bimodal	El pico mayor representa el 20% de las muestras y se encuentran en el valor de 2 ppm y el segundo reúne el 18% de las muestras con un 4 ppm en peso del elemento.
Th	bimodal	El pico mayor representa el 23% de las muestras y se encuentran en el valor de 8 ppm y el segundo reúne el 18% de las muestras con un 4 ppm del elemento.
Gd	unimodal	El principal pico concentra el 24% de las muestras con un aproximado de 3 ppm del elemento, con un sesgo levemente positivo.
Mn	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 90% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.
Mg	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 59% de las muestras en el valor de 0,3% en peso del elemento.
Ti	bimodal	El pico mayor representa el 26% de las muestras y se encuentran en valores menores al 0,1% y el segundo reúne el 20% de las muestras con un 0,3% en peso del elemento.
S	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 60% de las muestras en el valor de 0,2% en peso del elemento.

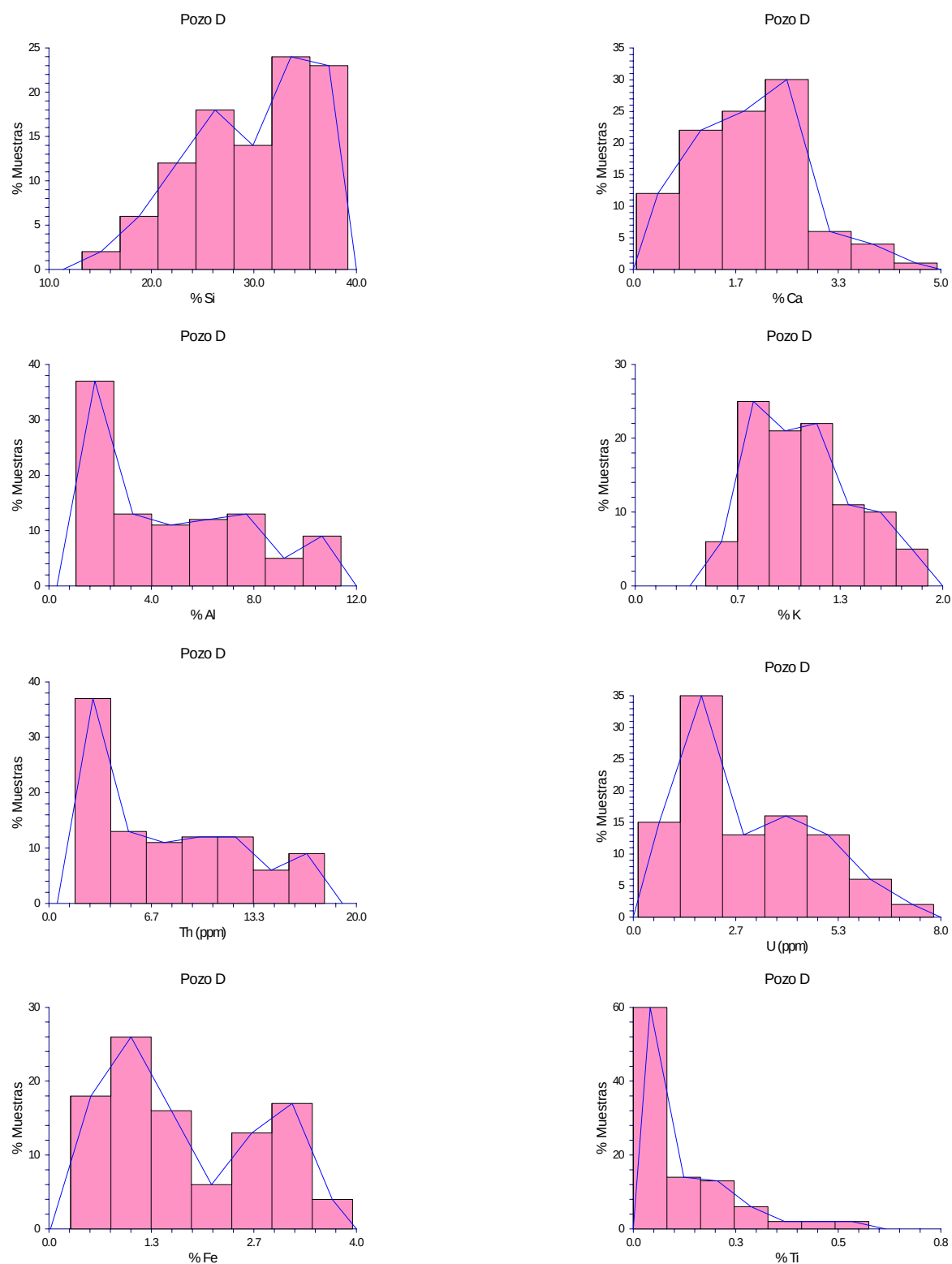


Figura 5.33. Histogramas y polígonos de frecuencia químicos del Pozo D

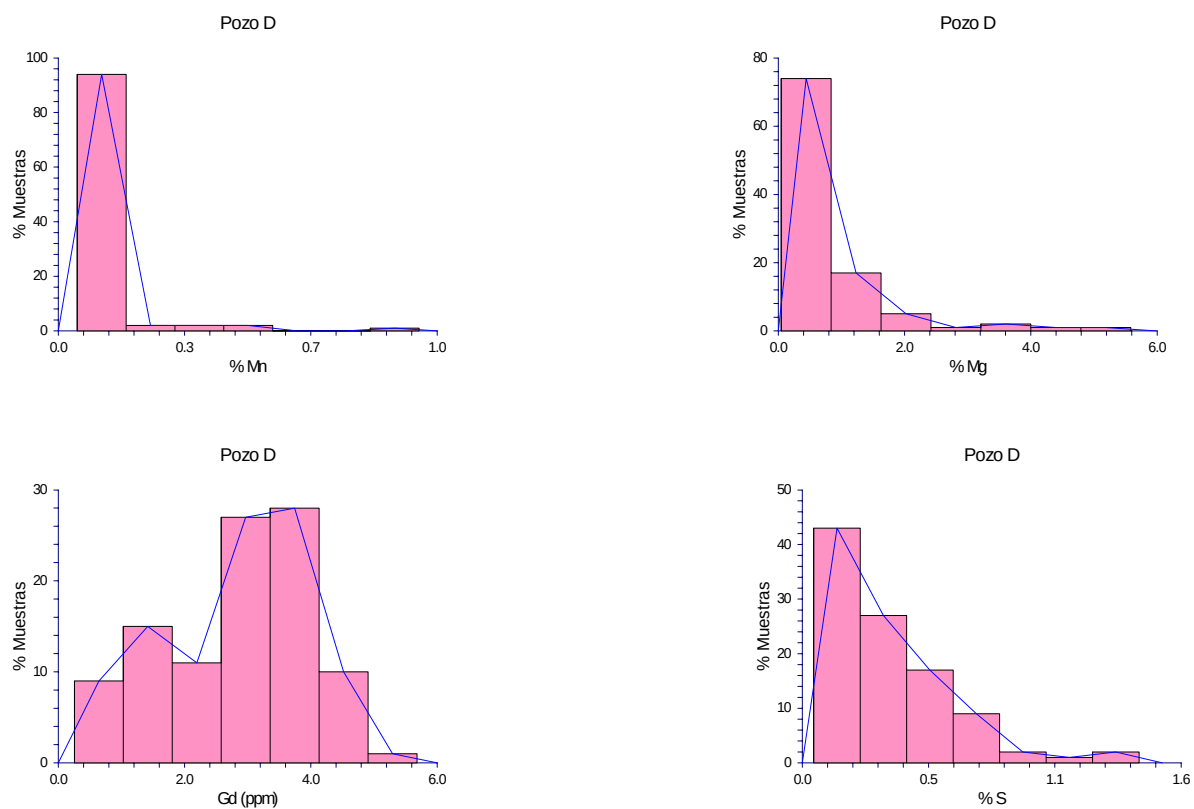


Figura 5.33. (Continuación)

Tabla 5.12. Análisis de los Histograma del Pozo D.

Elemento	Moda	Carácter de la curva
Si	bimodal	El pico mayor representa el 25% de las muestras y se encuentran en el valor de 32% y el segundo reúne el 18% de las muestras con un 25% en peso del elemento.
Al	unimodal	El principal pico concentra el 38% de las muestras con un 1,6% en peso del elemento, mostrando un sesgo positivo.
Ca	unimodal	El principal pico concentra el 30% de las muestras con un 2,5% en peso del elemento, mostrando un sesgo positivo.
Fe	bimodal	El pico mayor representa el 26% de las muestras y se encuentran en el valor de 1% y el segundo reúne el 18% de las muestras con un 3,2% en peso del elemento.
K	bimodal	El pico mayor representa el 25% de las muestras y se encuentran en el valor de 0,8% y el segundo reúne el 24% de las muestras con un 1,2% en peso del elemento.
U	unimodal	El pico de mayor magnitud concentra el 35% de las muestras con 2ppm del elemento, mostrando un sesgo positivo.
Th	unimodal	El principal pico concentra el 36% de las muestras con un aproximado de 3ppm del elemento, con un sesgo positiva.
Gd	bimodal	El pico mayor representa el 28% de las muestras y se encuentran en el valor de 4 ppm y el segundo reúne el 15% de las muestras con un 3 ppm del elemento.
Mn	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 90% de las muestras en valores menores al 0,1% en peso del elemento.
Mg	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 74% de las muestras en el valor de 0,4% en peso del elemento.
Ti	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 60% de las muestras y representa valores menores al 0,1% en peso del elemento.
S	unimodal	Presenta un sesgo positivo, el pico más alto reúne 43% de las muestras en el valor de 0,1% en peso del elemento.

Los histogramas realizados para cada uno de los pozos nos permiten observar que existe una variación bimodal mayormente en los elementos asociados a los minerales de arcillas principalmente en los pozos B y C; mientras que en los pozos A y D, el elemento Si presenta una tendencia bimodal.

5.7. Diagrama de caja para todos los pozos

Un diagrama de caja o “boxplot” es una manera de resumir un conjunto de datos medidos en un intervalo dentro de una escala dada. A menudo se utilizan en análisis exploratorios de datos. Es un tipo de gráficos que se utiliza para mostrar la forma de la distribución, su valor central, y la variabilidad (ARMAS 1998).

Este tipo de gráficos permite observar de manera simultánea un grupo de información de los datos, como son la tendencia, dispersión y simetría de los mismos. Además permite identificar las medidas descriptivas como la mediana, primer cuartil, tercer cuartil, valor máximo y valor mínimo; así como los valores atípicos que son los que se alejan del resto de los datos (ARMAS 1998).

Debido a la facilidad de construcción del gráfico y de realizar la interpretación, además que permite comparar simultáneamente varios grupos de datos sin perder información, ni sobrecargarse, por ello se escogió este tipo de gráfico para realizar comparación entre las unidades estudiadas (ARMAS 1998).

Para todos los pozos se realizaron los diagramas de cajas para cada elemento estudiado; se utilizaron aquellos que suministraban información relevante entre las unidades de los pozos.

5.7.1. Descripción entre los pozos para cada elemento y por unidad definida

Si

Al realizar la comparación entre los pozos para el elemento **Si** se pudo determinar que existe una alta correlación entre todos los pozos A, B, C y D. La tendencia de las medianas de las unidades separa en dos grupos los pozos en A-C y B-D de acuerdo al grado de similitud entre ellos. La mayor diferencia entre los pozos evaluados se encuentra en la unidad 4 de cada uno, donde se muestra variación en la tendencia (figura 5.34).

Cabe destacar que el mayor contenido del elemento Si para los cuatro pozos se encuentra en la unidad 2. Por su parte, no se reconoció una única tendencia para los valores menores.

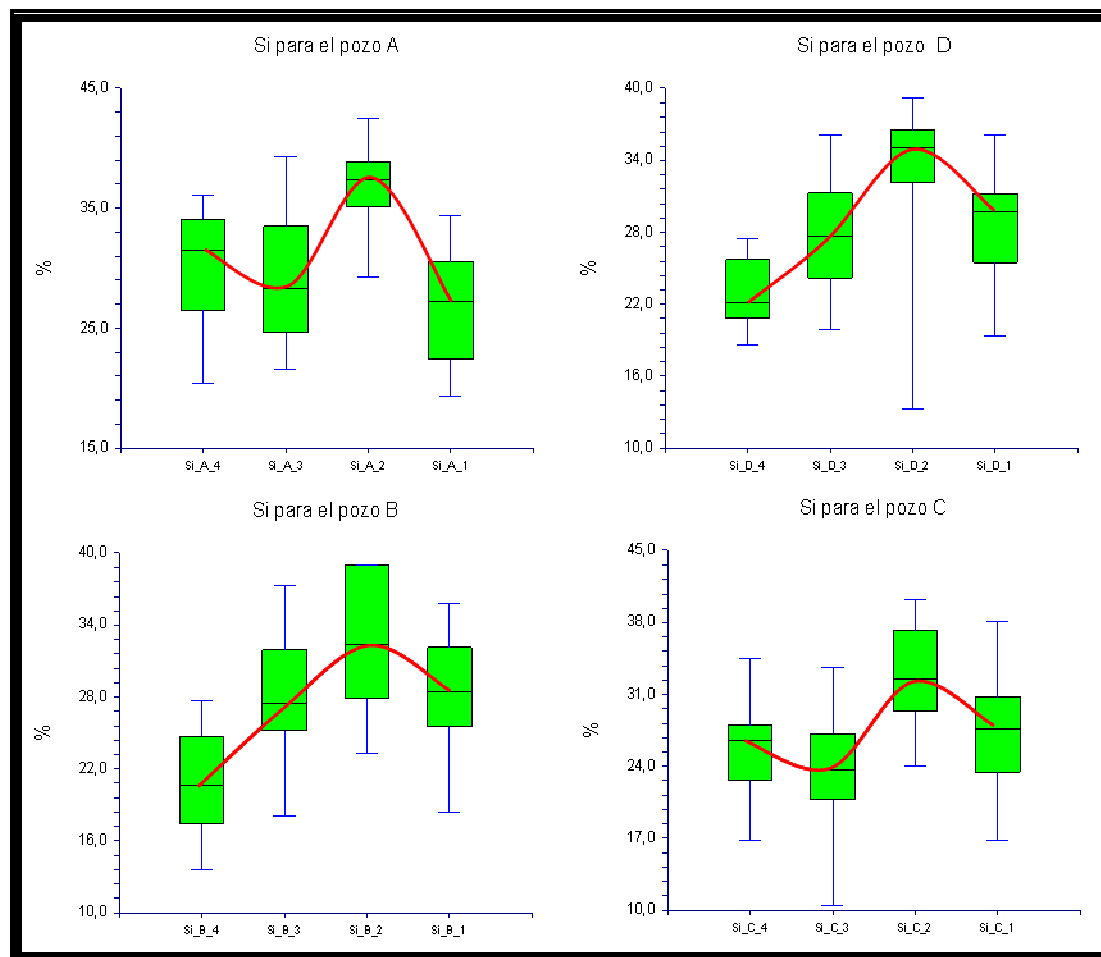


Figura 5.34. Comparación del elemento Si entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

Fe

Para el caso del elemento **Fe** las tendencias de las medianas para cada uno de los pozos permiten separarlos igualmente en A-C y B-D, aunque en la magnitud de las inflexiones y los valores que toman las medianas la agrupación son diferente A-D y B-C. Las mayores diferencias para este elemento, al igual que para el Si, se encuentran en la unidad 4 de cada pozo (figura 5.35).

El diagrama de caja nos permite ver como para el Fe, el menor valor alcanzado dentro de las unidades se encuentra en la unidad número 2; mientras que los mayores valores se ubican en la unidad 3 de los pozos A, B y C, y en la unidad 4 para el pozo D.

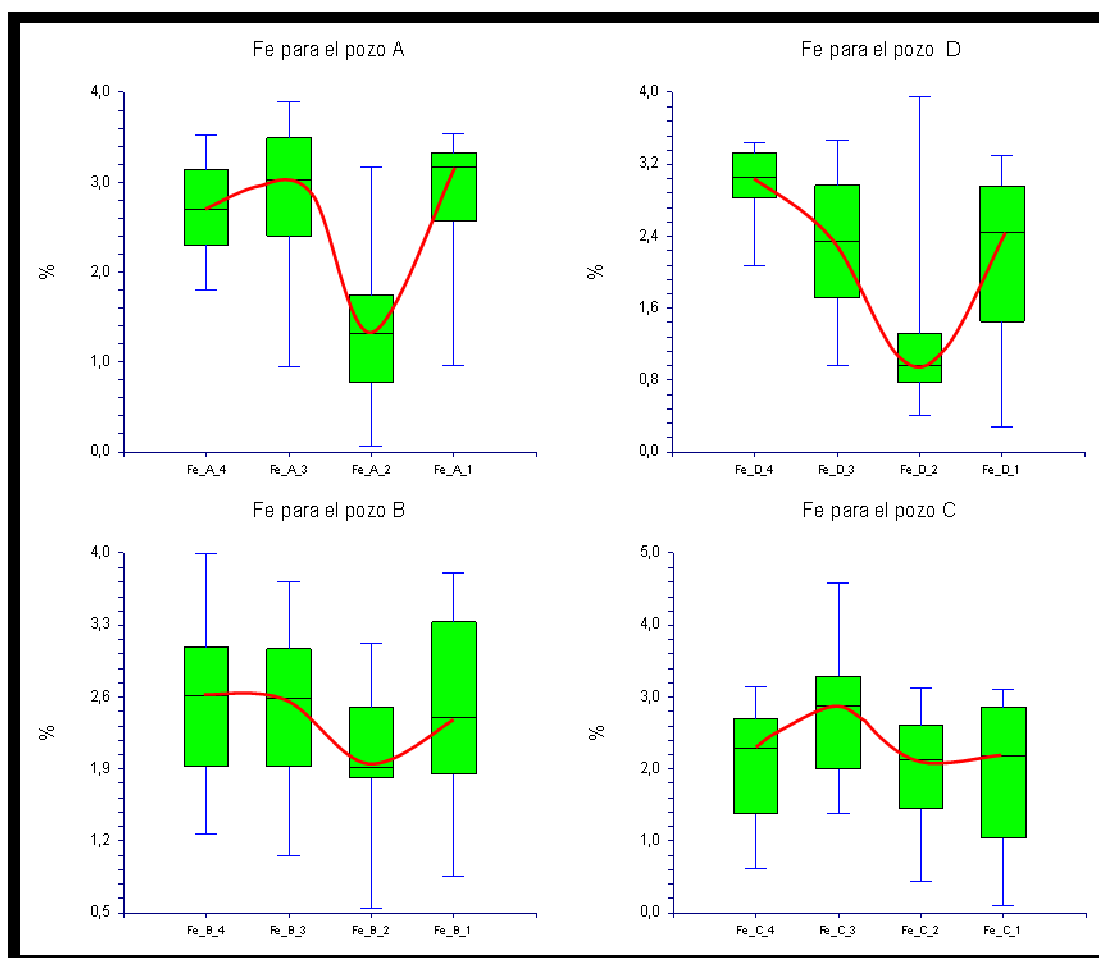


Figura 5.35. Comparación del elemento Fe entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

Th

Para el elemento **Th** dentro de los pozos se mantiene la misma tendencia de las medianas mostrada por los otros elementos descritos anteriormente, agrupando los pozos A-C y B-D. Por otra parte, evaluando los valores tomados por las medianas de cada unidad se encuentra que la agrupación es diferente siendo mejor entre A-D y B-C. Al igual que los elementos anteriores, la mayor diferencia la presenta es la unidad 4 de cada uno de los pozos (figura 5.36).

Para este elemento no existe una unidad en común que represente los valores mayores y menores del elemento Th. Los menores valores los presentan la unidad 2 de cada uno para en los pozos A, B y D. y la unidad 4 para el pozo C. En cuanto a los valores mayores, se observó que la tendencia es más dispersa ya que para el pozo A es la unidad A-1, para el pozo C es la unidad C-3, y es la unidad 4 para los pozos B y D.

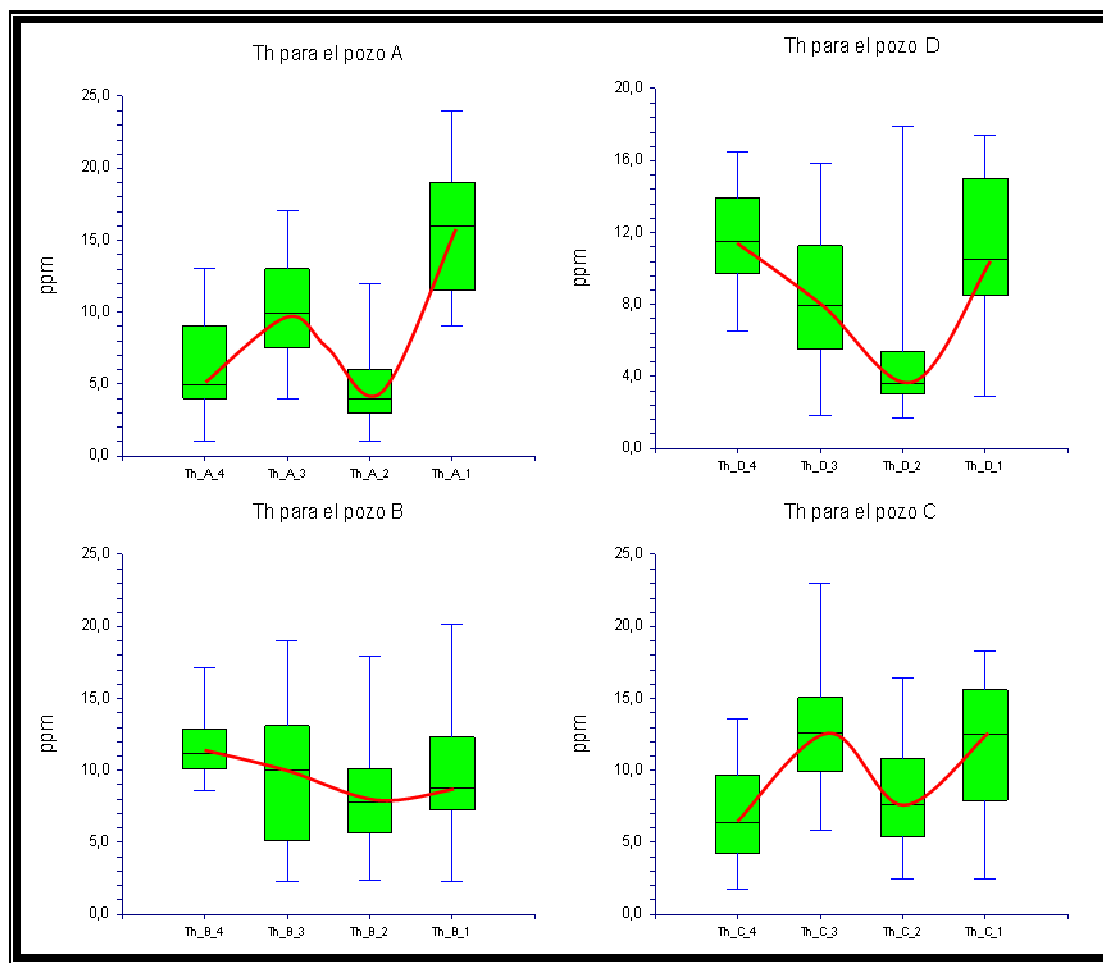


Figura 5.36. Comparación del elemento Th entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

Ti

Para el elemento **Ti** se tiene que en los cuatro pozos se observó un comportamiento similar entre todos. La única diferencia se presenta en el pozo C, el cual muestra valores relativamente bajos para la unidad C-1 (figura 5.37).

La unidad 2 para los pozos A, B y D es la que presenta menores valores y para el pozo C es la unidad C-4. La unidad 3 en todos los pozos es la que reúne los valores más altos.

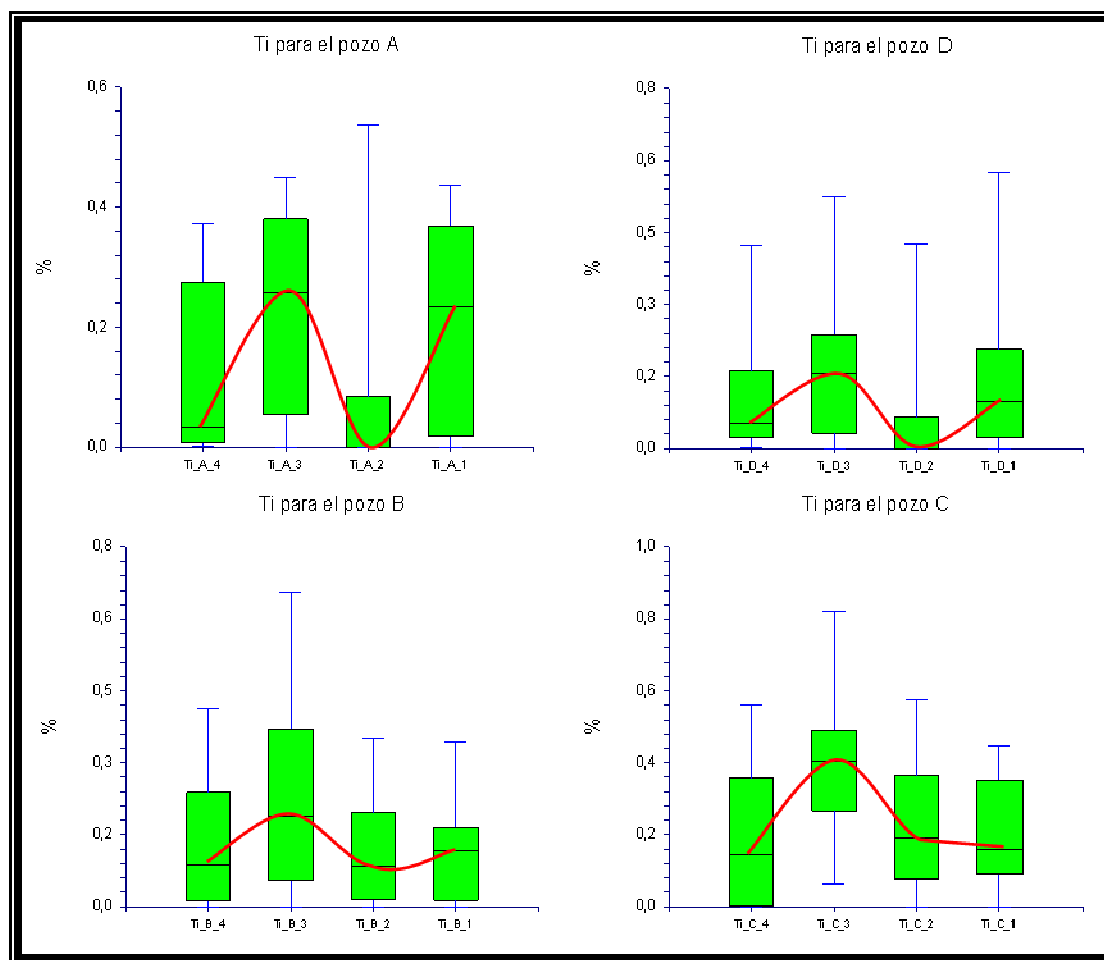


Figura 5.37. Comparación del elemento Ti entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

U

El elemento U muestra una buena correlación en la tendencia de las medianas entre los pozos A-C. En los pozos B-D presenta un comportamiento similar en cuanto a sus medianas donde varían con respecto a la magnitud de las inflexiones hechas por las unidades. En relación a los valores de las medianas por unidad, estas presentan mejor relación entre los pozos A-D y B-C (figura 5.38).

Todos los pozos coinciden en que la unidad donde se presenta el menor contenido del elemento U es el la número 2; en cuanto a la unidad con los mayores valores no coincide para todos los pozos.

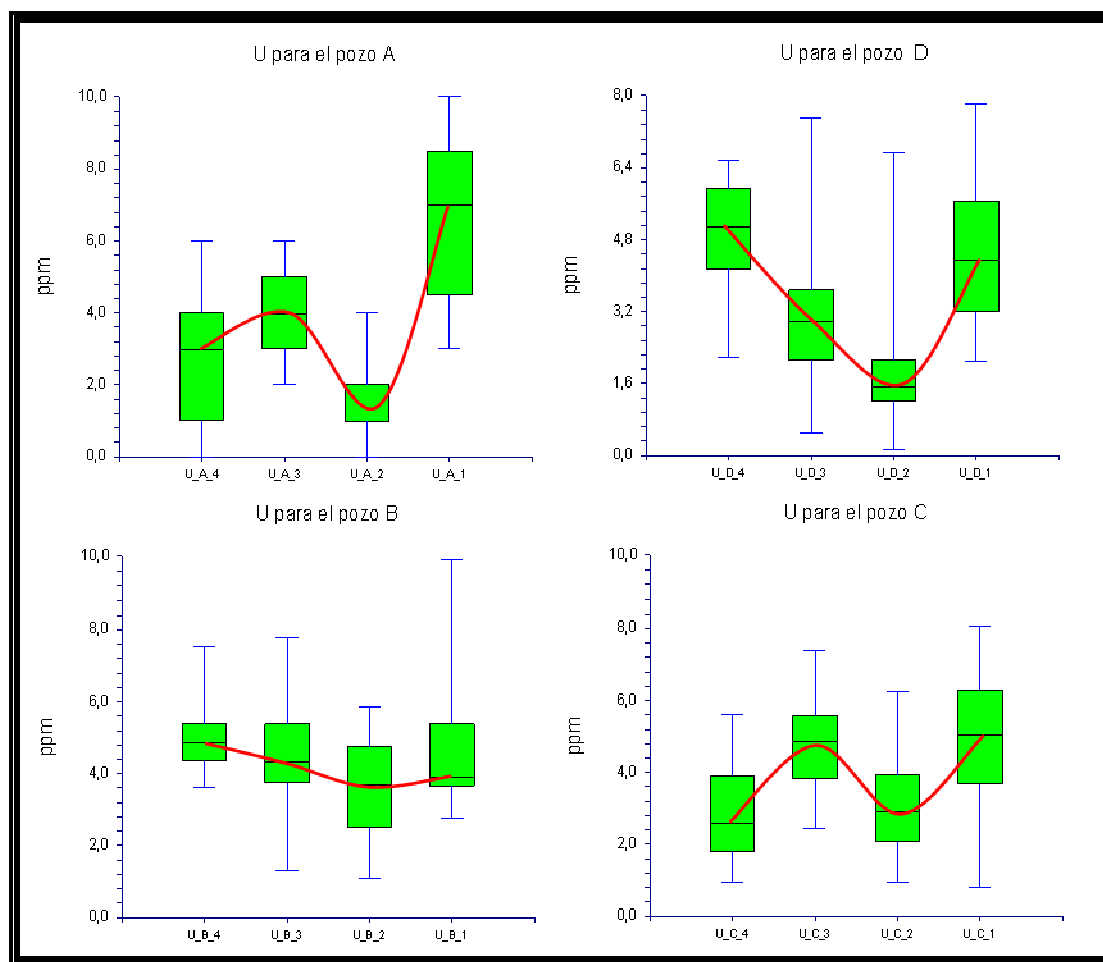


Figura 5.38. Comparación del elemento U entre los cuatro pozos evaluados, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

AI

Dentro de los diagramas analizados se pudo observar que la mayor similitud entre las tendencias del comportamiento de las medianas para el elemento **AI** lo presentan los pozos B y D, en los cuales sólo varían levemente la magnitud de las deflexiones de la trayectorias de las mismas. Vale señalar que el pozo C posee mayor similitud entre los pozos B y D hasta la unidad D-3 pero en la unidad D-4 difieren en su tendencia. Así mismo el pozo A no posee similitud con ninguno de los restantes pozos con respecto a este elemento (figura 5.39).

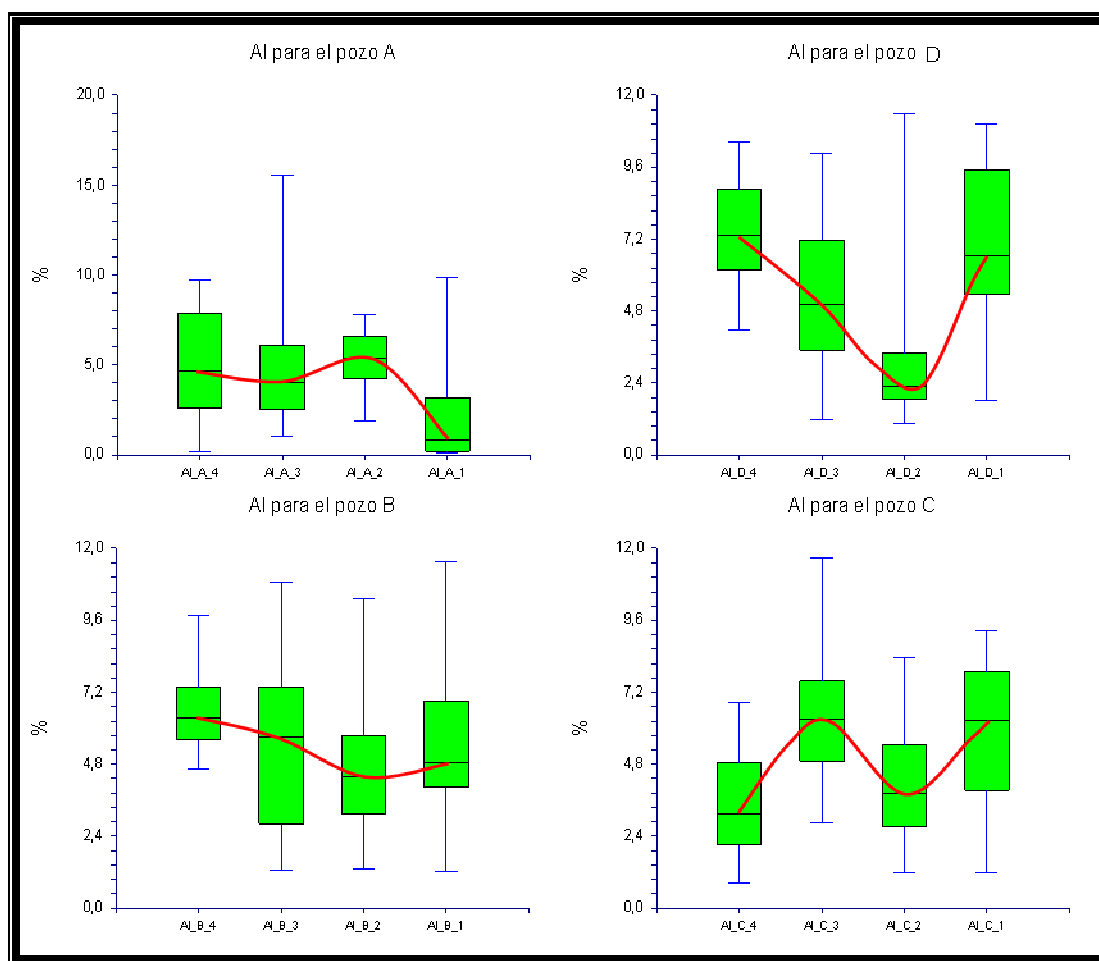


Figura 5.39. Comparación del elemento Al entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

K

El elemento **K** presenta el mayor grado de dispersión en cuanto al comportamiento de las medianas al comparar todos los pozos. Los pozos A y D presenta el mayor grado de relación entre ellos sólo variando en la unidad 4 definida en cada pozo (figura 5.60).

Para los pozos B y C, los menores valores los posee la unidad 1 mientras que para A y D los posee la unidad 2.

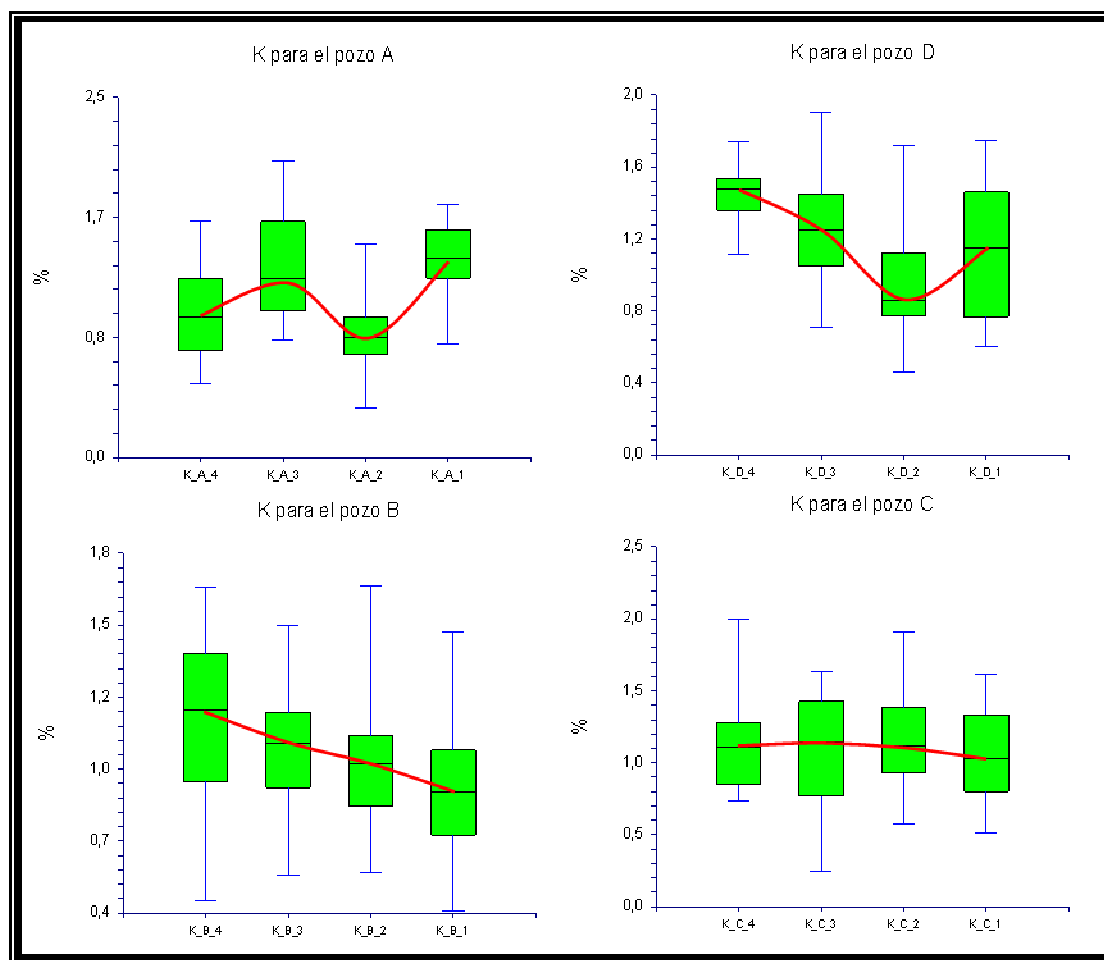


Figura 5.40. Comparación del elemento K entre los cuatro pozos evaluado, la línea roja muestra el comportamiento de la mediana a través de cada pozo.

Al observar los diagramas de caja que se expusieron anteriormente se puede señalar que existe una buena similitud en la tendencia de las medianas para las unidades determinadas en cada pozo. Siendo la unidad 2 la que exhibe una mejor similitud entre los cuatro pozos, seguidos por las unidades 3 y 1. La variación mayor la presentaron los elementos K y Al, lo cual se encuentra relacionado con la el tipo de mineral de arcilla presente en cada una de las unidades.

5.8. Análisis Estadísticas Multivariantes

5.8.1 Análisis de agrupaciones

Para este trabajo de investigación se construyeron dendrogramas de agrupación de las variables mediante la utilización de programa “Multi-Variante Statistiacal Package MVSP 3.1 ®” empleando la aplicación de análisis de agrupación mediante el método “del vecino más lejano” con distancia euclidianas aplicando el método constreñido para lograr mantener el orden estratigráfico de las muestras dentro de los pozos. Dentro de las variables empleadas se manejaron distintas unidades para ellas por lo cual se debió estandarizar los datos.

Para realizar este análisis se manejaron diez variables de elementos mayoritarios como Si, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Gd, Ti y S sumado a estas se encuentran las tres variables tomadas por el registro espectral de Gamma Ray: K, Th y U.

5.8.1.1. Análisis de agrupaciones para el pozo A

Al aplicar estos análisis a las variables manejadas para el pozo A, se encontró que para el dendrograma se pueden definir cuatro agrupaciones mayores G-A-1, G-A-2, G-A-3 y G-A-4 las cuales se encuentran señaladas en la figura 5.41.

Los límites de los grupos mayores de los dendrogramas coinciden en su gran mayoría con los límites definidos por los cambios en las concentraciones presentes en la gran mayoría de las variables químicas analizadas en los perfiles verticales de concentración de los elementos. El límite de grupo G-A-3 y G-A-4 no coincide con el respectivo cambio entre las unidades A-3 y A-4. La diferencia apreciable presente en los perfiles de verticales a la profundidad de 1635' (498.4 m), donde se presenta el cambio de grupo dentro del dendrograma, es una inflexiones de magnitud alta que coincide con valores máximos alcanzados para los elementos Al y Th.

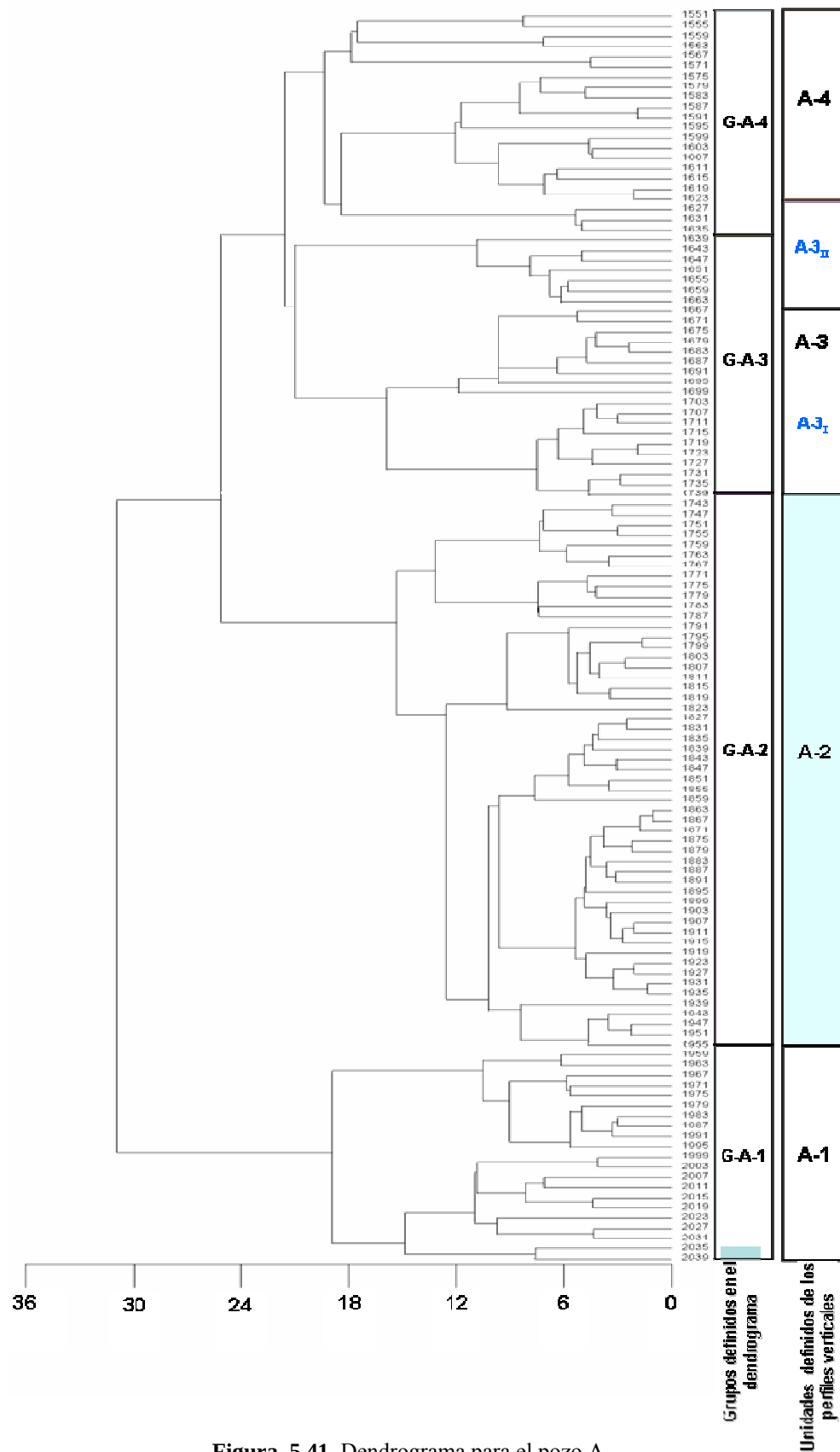


Figura 5.41. Dendrograma para el pozo A

5.8.1.2. Análisis de agrupaciones para el pozo B

Para el dendrograma del pozo B se definieron cuatro grupos mayores G-B-1, G-B-2, G-B-3 y G-B-4, donde sus límites coinciden solamente en el cambio del G-B-1 y G-B-2 con los límites de las unidades A-1 y A-2 definidas en los perfiles verticales.

Para los límites de los grupos G-B-2 y G-B-3 se encuentra que este cambio está relacionado con cambios en los perfiles verticales presentes en el elemento U, mostrando inflexiones de alta magnitud donde toma valores máximos. Mientras que el cambio entre los grupos G-B-3 y G-B-4 se definen por las inflexiones mostradas por los elementos Al y Th donde éstos toman valores máximos (figura 5.42).

5.8.1.3. Análisis de agrupaciones para el pozo C

En el análisis de agrupación dendrograma se definieron cuatro grupos mayores: G-C-1, G-C-2, G-C-3 y G-C-4, para este pozo. Los límites de cada grupo coinciden en su totalidad con los límites de las unidades que se definieron dentro de los perfiles verticales de los elementos evaluados (figura 5.43).

5.8.1.4. Análisis de agrupaciones para el pozo D

Para el dendrograma correspondiente al pozo D se definieron cuatro grupos mayores G-D-1, G-D-2, G-D-3 y G-D-4. En cuanto a la relación de las unidades que se definieron en los perfiles verticales y los grupos de los dendrogramas se puede decir que presentan una gran afinidad entre sus límites; sólo hacia la parte superior se presentan algunas diferencias donde la unidad D-3 se encuentran repartida entre los grupos G-D-3 y G-D-4 (figura 5.44).

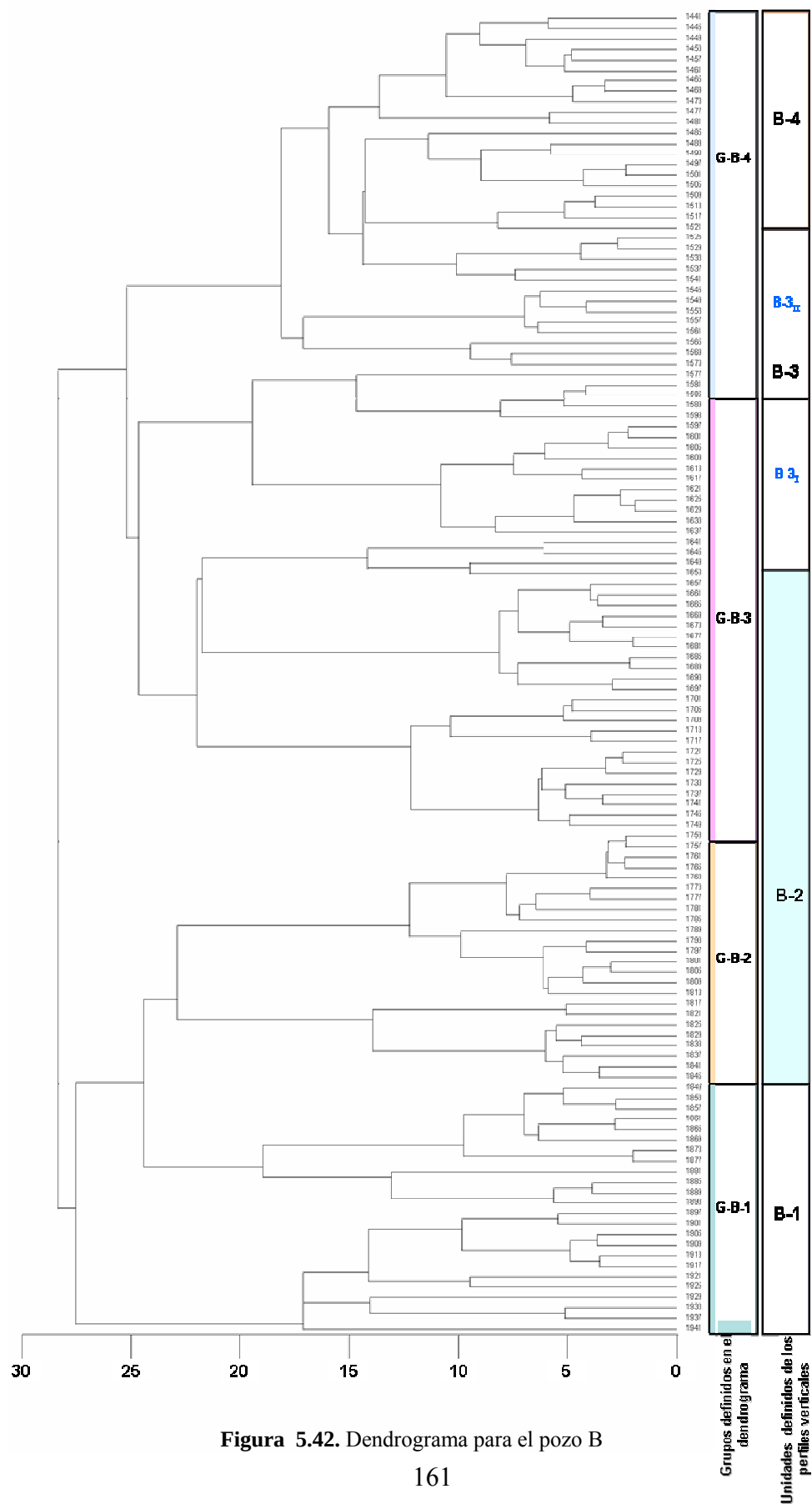


Figura 5.42. Dendrograma para el pozo B

A través del desarrollo de la estadística multivariante con los gráficos de los dendrogramas para cada pozo en estudio dentro de este trabajo, se logró corroborar de una manera independiente la correcta definición de las unidades químicas mayores previamente realizadas a partir de los perfiles verticales. De acuerdo a la variación de cada elemento evaluado, se dividió el grupo de muestras para todos los pozos en cuatro grupos mayores tanto con los dendrogramas como con los perfiles. Así mismo se puede establecer la influencia que posee los cambios presentes en algunos elementos al momento de realizar este tipo de análisis, produciendo diferentes agrupaciones de las muestras. Estos elementos son Th, U y Al.

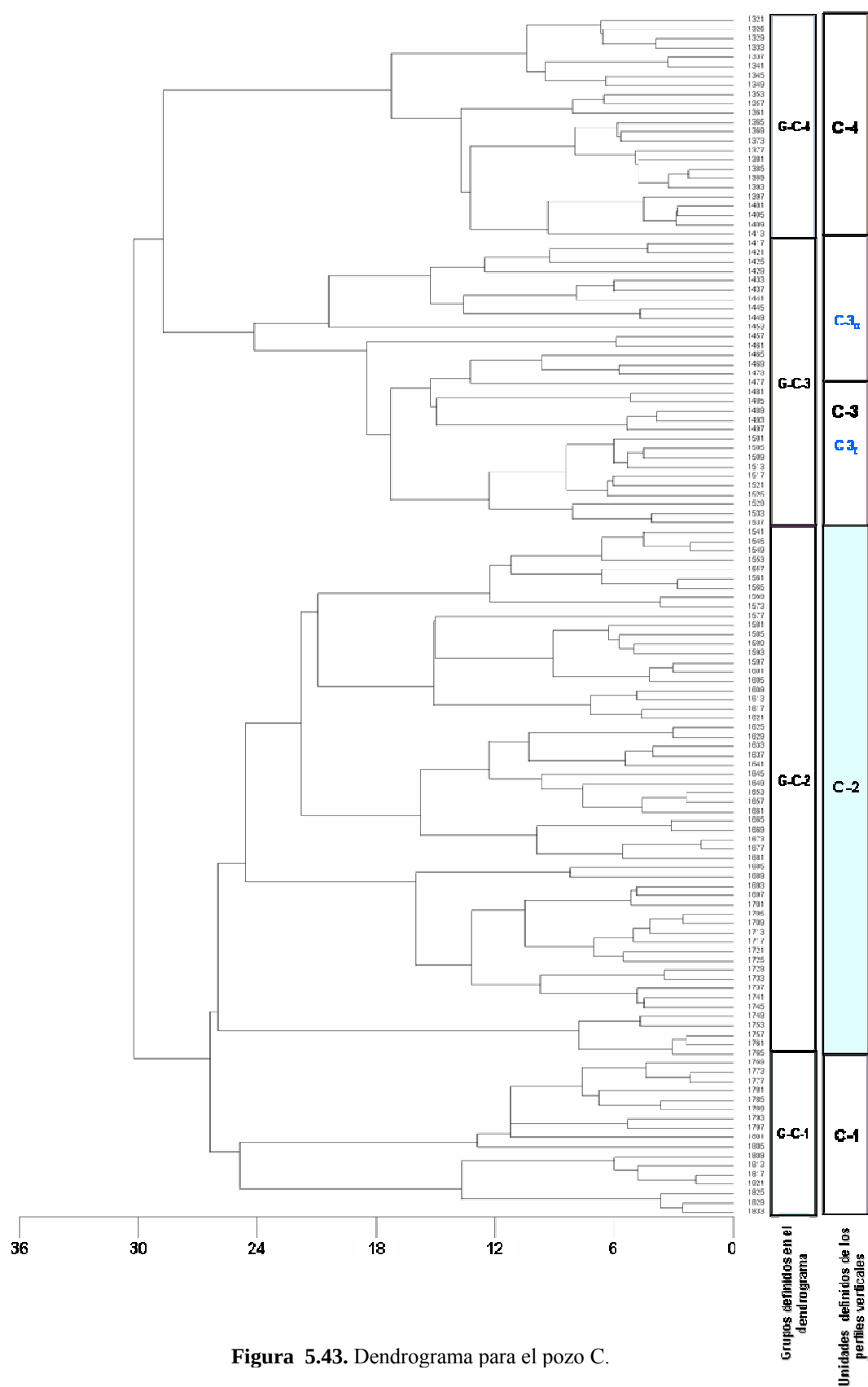


Figura 5.43. Dendrograma para el pozo C.

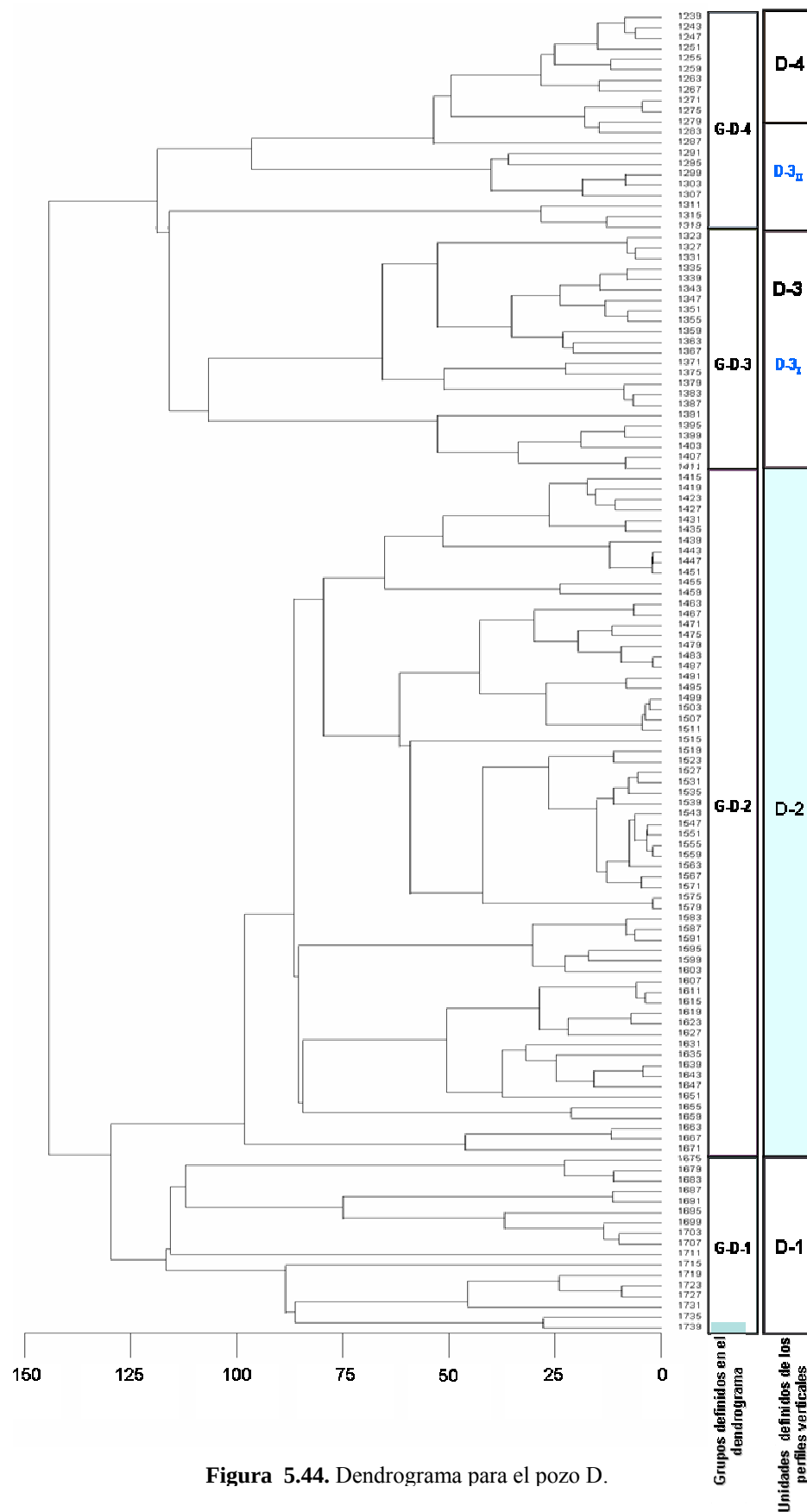


Figura 5.44. Dendrograma para el pozo D.

5.9. Funciones discriminantes

El objetivo principal de los análisis de funciones discriminantes es permitir determinar la pertenencia a un grupo de una muestra basados en una combinación lineal de las muestras dentro de un intervalo. El procedimiento de discriminación comienza con una serie de observaciones o variables de cada muestra, conjuntamente con una previa clasificación de las muestras. El resultado final del procedimiento es un modelo que permite la predicción de la pertenencia a un grupo cuando sólo las variables son conocidas. Un segundo propósito del análisis de las funciones discriminantes es la comprensión del conjunto de los datos (CHACÍN 2003).

5.9.1. Separación de las unidades mayores químicas para cada pozo estudiado

Para cada uno de los pozos se definieron cuatro unidades mayores basándose en los perfiles verticales de la variación en profundidad para cada elemento conjuntamente con el dendrograma. Estas unidades definidas serán analizadas mediante el uso de funciones discriminantes aplicando como factor discriminante las unidades previamente definidas.

5.9.1.1. Pozo A

En la figura 5.45 se muestra como las unidades químicas mayores para este pozo exhiben una buena discriminación entre ellas. Para la unidad A-3 se observa una buena separación del resto de las unidades, seguida por la unidad A-1 que posee un leve solapamiento con la unidad A-2. Este solapamiento probablemente se deba a que el límite entre ambas no se encuentra definido claramente, de igual forma se observan muestras correspondientes al grupo más alejado A-4 relacionado con el grupo A-2 ya que poseen similitud en sus características químicas.

La unidad A-4 presenta en general la mayor dispersión dentro de estas unidades definidas lo que se puede asociar a la falta de muestras que permitan una mejor clasificación de secuencia como unidad o su inclusión en la unidad adyacente A-3, aunque

ambas unidades se separaran en los perfiles verticales debido al cambio que se muestra en el aumento de minerales de arcillas, pero químicamente son muy parecidas.

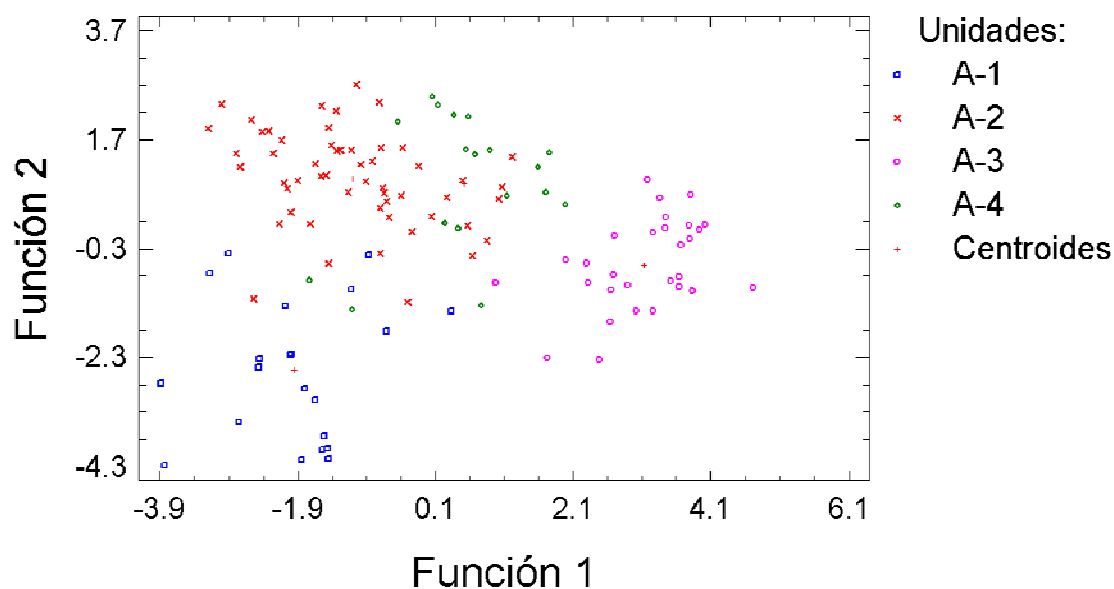


Figura 5.45. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo A.

En la tabla 5.13. se muestra como las unidades A-3 y A-4 poseen número de muestras con más de un 90% de muestras correctamente clasificadas.

Tabla 5.13. Clasificación de las muestras del pozo A por cada unidad.

		Grupos de predicción			
Grupo actual	Número de muestras	Unidad A-1	Unidad A-2	Unidad A-3	Unidad A-4
Unidad A-1	21	18 (85.71%)	1 (4.76%)	0	2 (9.52%)
Unidad A-2	54	1 (1.85%)	50 (92.59%)	0	3 (5.56%)
Unidad A-3	29	0	0	28 (96.55%)	1 (3.45%)
Unidad A-4	19	2 (10.53%)	0	0	17 (89.47%)
Casos correctamente clasificados: 91.87%					

Para este pozo se definieron dentro de la unidad A-3, dos subunidades A-3_I y A-3_{II}, con las cuales se realizó funciones discriminantes junto con las demás unidades. Su representación grafica se observa en la figura 5.42, además para esta unidad se aplicó una separación por tipos litológicos que se muestran en la figura 5.43.

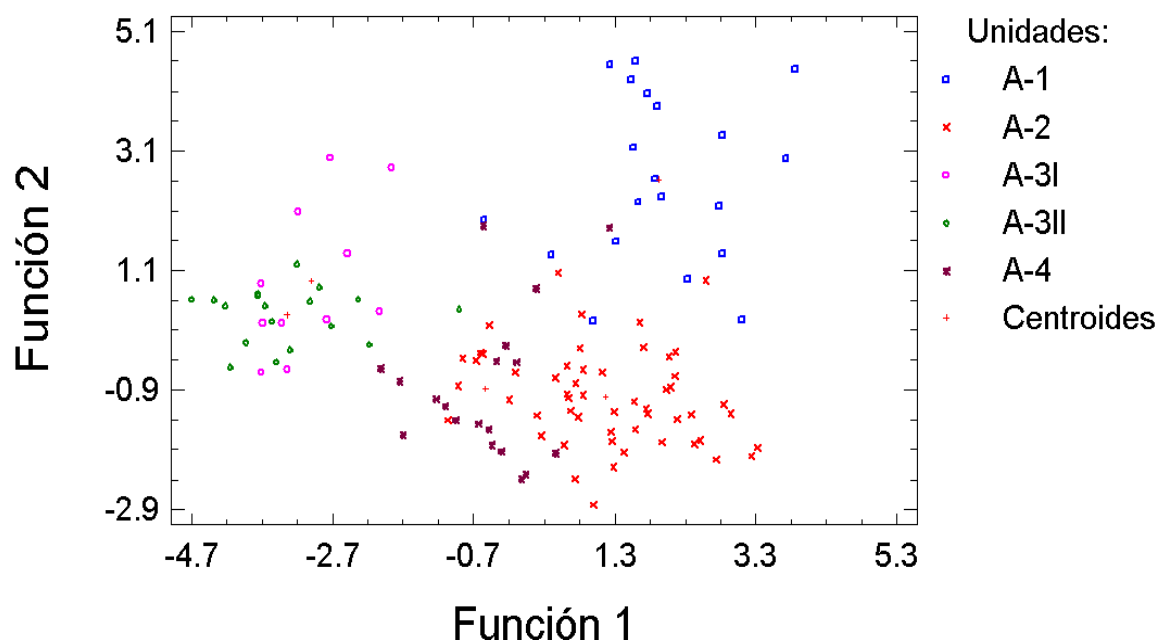


Figura 5.46. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades A-3_I y A-3_{II}.

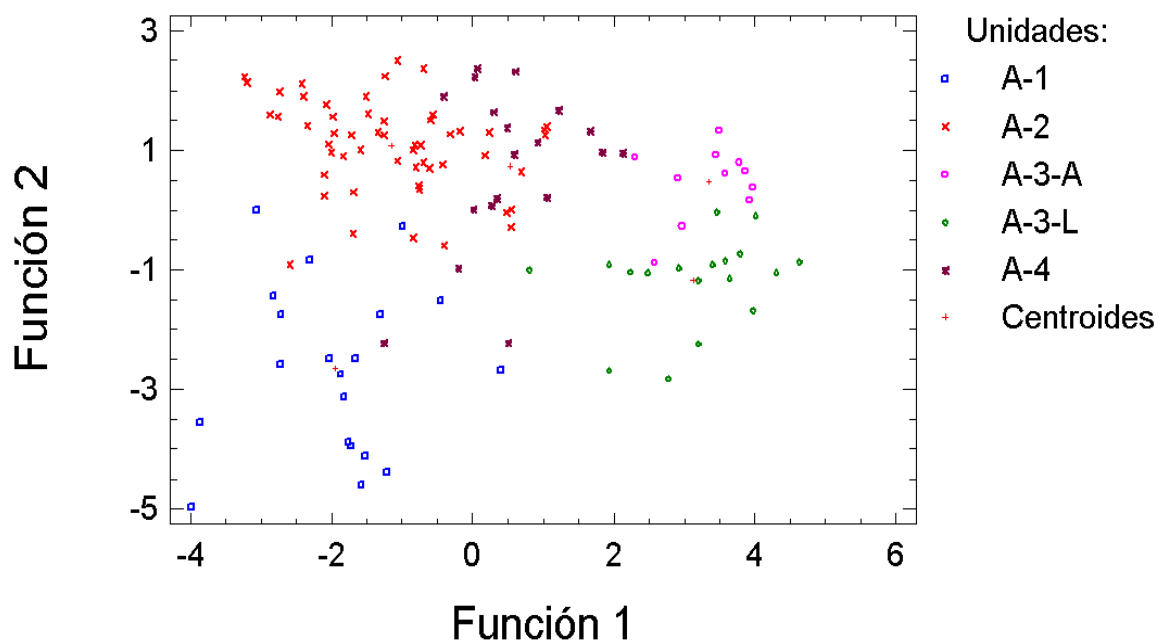


Figura 5.47. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad A-3 (A-3_L– Lutitas y A-3_A- Areniscas).

Con esto se puede ver la separación entre las subunidades establecidas dentro de la unidad mayor A-3 y como esta separación corresponde a características litológicas.

5.9.1.2. Pozo B

Para este pozo las funciones discriminantes muestran una separación menos clara en varias de las unidades del pozo. La unidad B-2 presenta la mejor separación dentro del gráfico representando en la figura 5.48, seguido de la unidad B-1 aunque ésta presenta un solapamiento con la unidad B-3; por último la unidad B-4 posee un leve solapamiento con la B-3. Para la unidad B-3 se presenta una alta dispersión entrando en contacto con el resto de las unidades, esta dispersión puede estar asociada con la heterogeneidad litológica de la unidad.

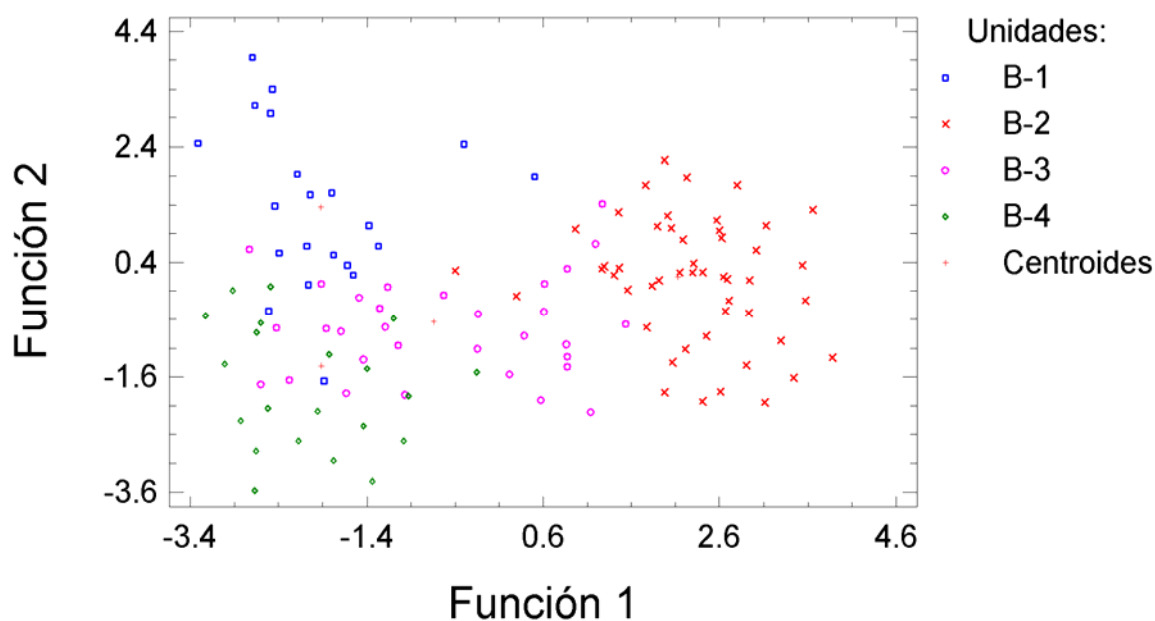


Figura 5.48. Representación gráfica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo B.

La tabla 5.14 muestra que el mayor número de muestras correctamente clasificadas lo poseen las unidades B-2 y B-4 con valores mayores al 90% de las muestras. A diferencia de esto, se encuentra que la unidad B-3 posee el menor valor de casos correctamente clasificadas con un 63%. En la figura 5.45 se observa que la unidad B-3 se encuentra separada en dos subunidades B-3_I y B-3_{II} (figura 5.49), la cual se relaciona con tipos de litologías diferentes que se encuentran dentro de esta unidad (ver la figura 5.50); donde las

muestras que son areniscas corresponden con la subunidad B-3_A, mientras que las lutitas corresponden con la subunidad B-3_L. De esta forma se logra comprender de manera gráfica que la separación entre las subunidades se debe al tipo de litología involucrada.

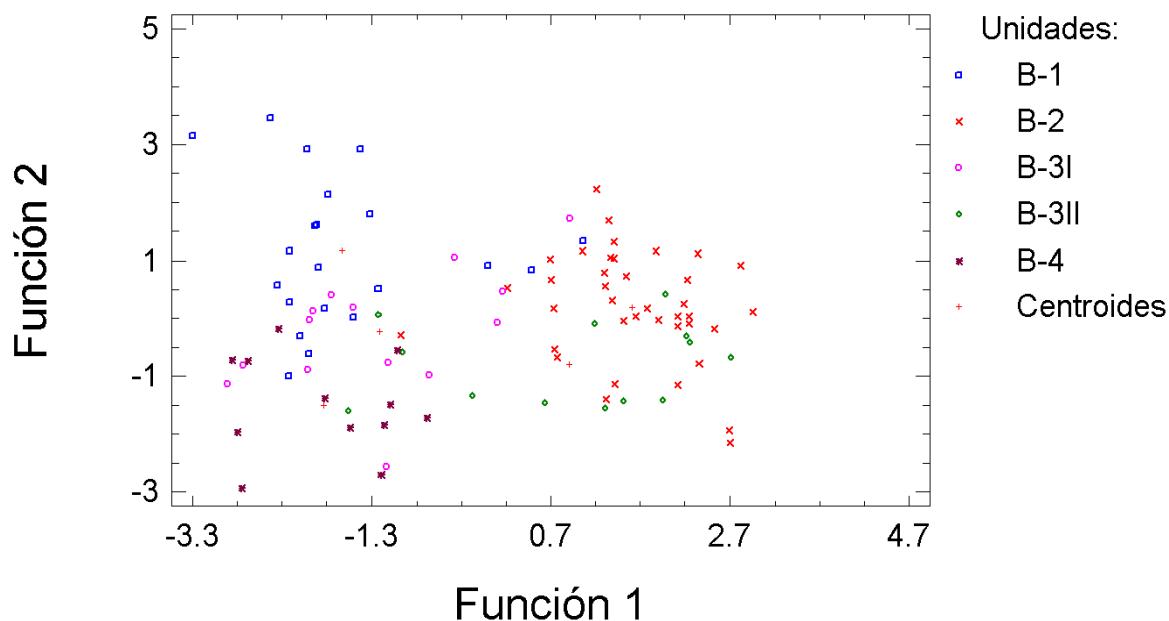


Figura 5.49. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades B-3_I y B-3_{II}.

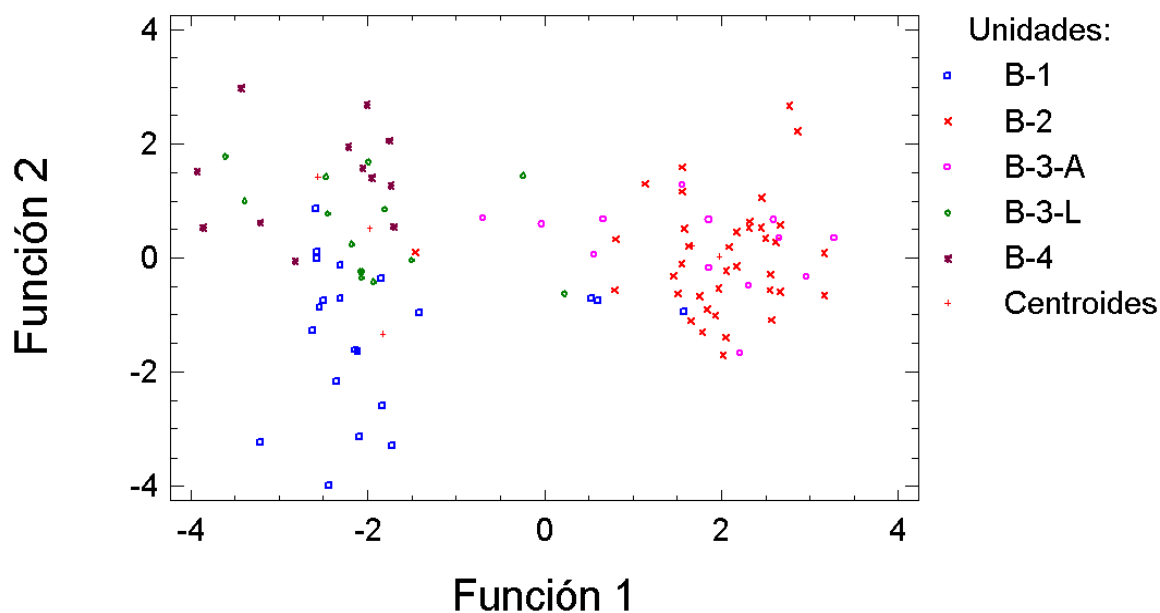


Figura 5.50. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad B-3 (B-3_L – lutitas y B-3_A - Areniscas).

Tabla 5.14. Clasificación de las muestras del pozo B por cada unidad.

Grupo actual	Número de muestras	Grupos de predicción			
		Unidad B-1	Unidad B-2	Unidad B-3	Unidad B-4
Unidad B-1	24	21 (87.4%)	1 (4.17%)	1 (4.17%)	1 (4.17%)
Unidad B-2	48	0	46 (95.84%)	1 (2.08%)	1 (2.08%)
Unidad B-3	33	2 (6.04%)	3 (9.15%)	21 (63.60%)	7 (21.21%)
Unidad B-4	21	0	0	2 (9.52%)	19 (90.48%)
Casos correctamente clasificados: 80.61 %					

5.9.1.3. Pozo C

Este pozo exhibe la menor separación entre todas las unidades. Este solapamiento se puede asociar con una litología muy uniforme a lo largo del pozo.

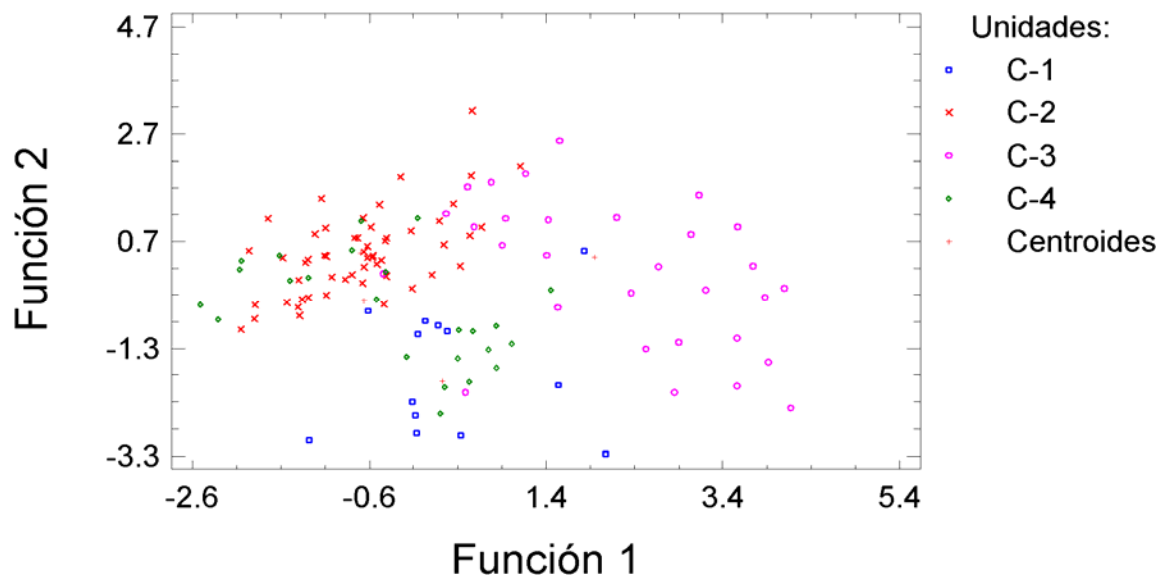


Figura 5.51. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo C.

En la figura 5.51 se puede observar como la mejor separación la posee la unidad C-3 con un leve solapamiento con las unidades C-1 y C-2. Igualmente las unidades C-1 y C-2

exhiben una buena separación, aunque la C-4 presenta una gran dispersión de sus muestras que se solapa con las unidades C-1 y C-2, lo cual puede asociarse a que esta unidad no se encuentra correctamente definida o no posee un número suficiente de muestras que mejore su caracterización. La tabla 5.15. nos muestra como el mayor número de muestras correctamente clasificadas las presentan las unidades C1, C2 y C3 con porcentajes mayores al 80%, mientras que la unidad C-4 posee el porcentaje más bajo con un 58% aproximadamente.

Tabla 5.15. Clasificación de las muestras del pozo C por cada unidad.

		Grupos de predicción			
Grupo actual	Número de muestras	Unidad C-1	Unidad C-2	Unidad C-3	Unidad C-4
Unidad C-1	17	15 (88.24%)	1 (5.88%)	1 (5.88%)	0
Unidad C-2	57	0	50 (87.72%)	3 (5.28%)	4 (7.02%)
Unidad C-3	31	0	4 (12.90%)	26 (83.87%)	1 (3.24%)
Unidad C-4	24	2 (4.17%)	8 (33.33%)	1 (4.17%)	14 (58.33%)
Casos correctamente clasificados: 81.25%					

5.9.1.4. Pozo D

Para el pozo D a diferencia de los descritos anteriormente (pozo B y C), la figura 5.52 muestra un aumento en la separación de las unidades, siendo la D-2 la que exhibe la mayor separación entre todas las unidades seguida de la D-3 con un leve solapamiento con las unidades D-1 y D-4. La unidad D-1 presenta una alta dispersión dentro del gráfico. En los valores de la tabla 5.16 se observa que la unidad con la mayor número de muestras correctamente clasificadas es la D-4 con un 100%, seguida por la D-2 con un 95% y la unidad D-1 posee la menor proporción de muestras correctamente clasificadas con un 75% aproximadamente.

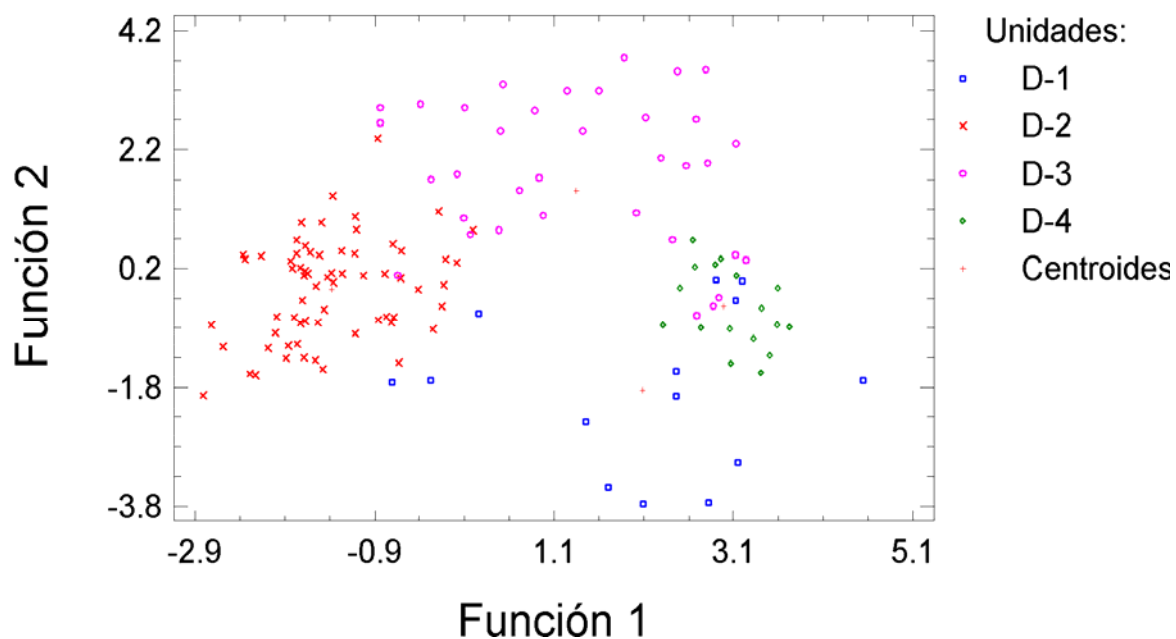


Figura 5.52. Representación gráfica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades del pozo D.

Dentro de la unidad D-3 igualmente se establecieron dos subunidades D-3_I y D-3_{II} y su representación gráfica de las funciones discriminantes con las demás unidades químicas mayores se visualiza en las figuras 5.53 y 5.54.

Tabla 5.16. Clasificación de las muestras del pozo D por cada unidad.

Grupo actual	Número de muestras	Grupos de predicción			
		Unidad D-1	Unidad D-2	Unidad D-3	Unidad D-4
Unidad D-1	16	12 (75%)	1 (6.25%)	0	3 (18.75%)
Unidad D-2	66	0	63 (95.45%)	3 (4.55%)	0
Unidad D-3	33	0	2 (6.07%)	28 (84.84%)	3 (9.09%)
Unidad D-4	11	0	0	0	11 (100%)
Casos correctamente clasificados: 90.43%					

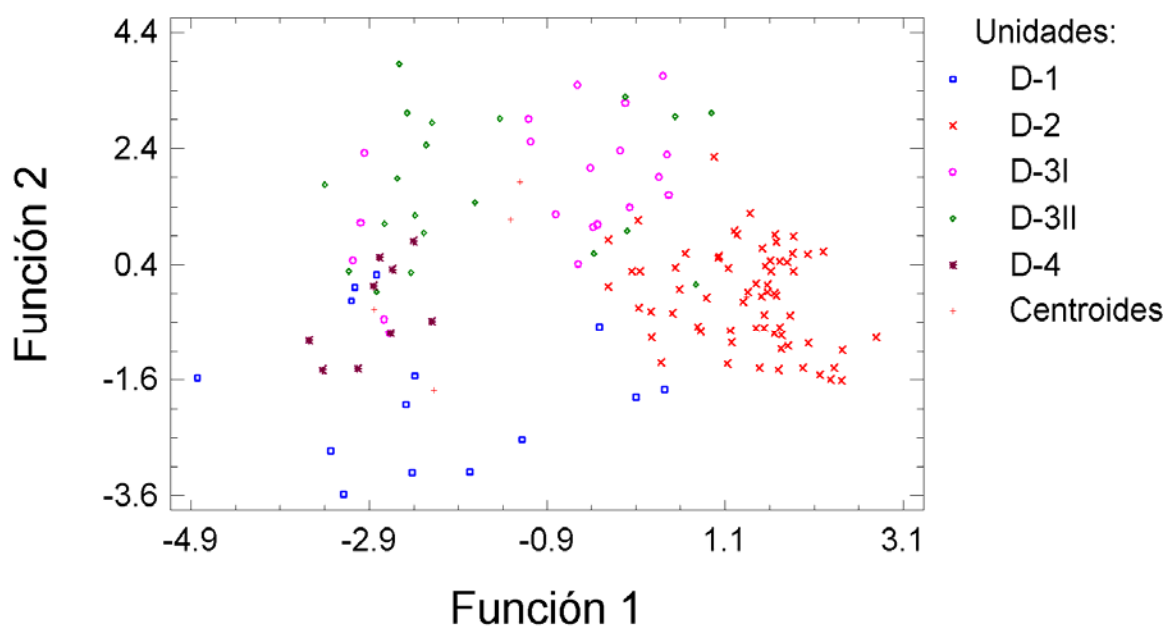


Figura 5.53. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las subunidades D-3_I y D-3_{II}.

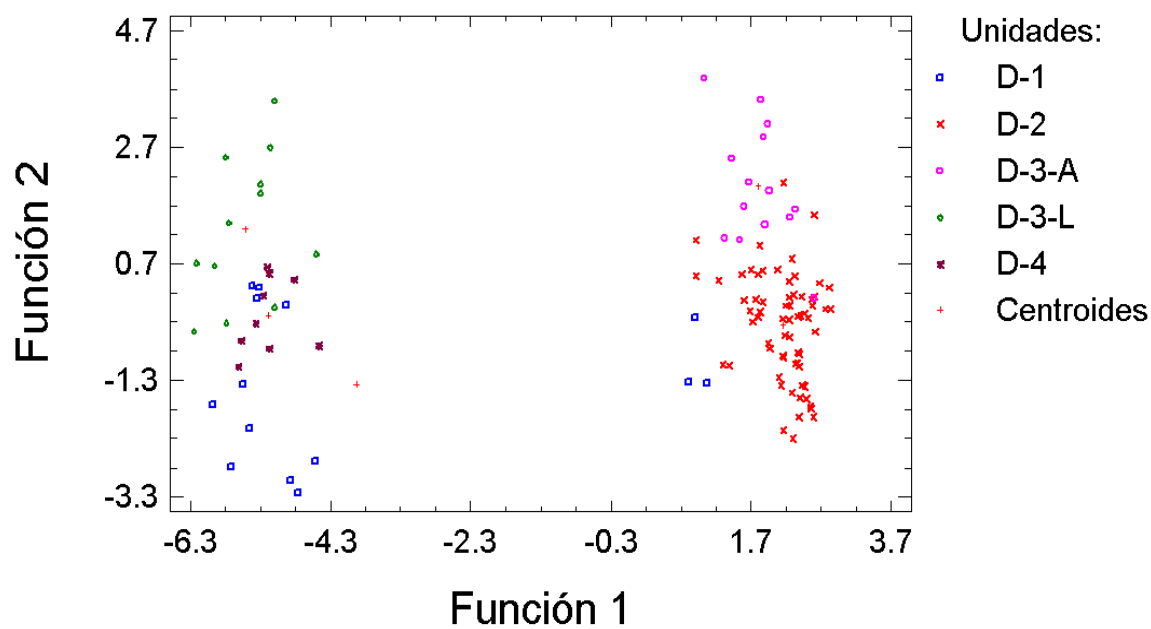


Figura 5.54. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente al tipo de litología presente en la unidad D-3 (D-3_L – Lutitas y D-3_A - Areniscas).

5.10. Correlación de las unidades químicas entre los pozos estudiados

Para los cuatro pozos que fueron analizados en este trabajo, se establecieron cuatro unidades mayores las cuales, al ser estudiadas por los distintos métodos estadísticos que se describieron en los puntos anteriores, se pudo determinar que mantienen tendencias químicas generales muy parecidas. Por lo tanto, se intentó comprobar si existe correlación entre ellos; de esta forma, se realizaron un conjunto de relaciones entre los pozos aplicando funciones discriminantes.

Considerando las tendencias químicas de las unidades definidas en los cuatro pozos junto con la distancia relativamente cercana entre ellos, es factible suponer que las unidades que tienen una misma posición estratigráfica en los pozos estudiados posiblemente representen unidades químicas “mayores” que posean una extensión regional en los 46 km² estudiados en este trabajo.

Por estas razones es bastante probable que las unidades A-1, B-1, C-1 y D-1 correspondan a una sola unidad química de mayor extensión ubicada en la parte inferior la secuencia estratigráfica estudiada. De igual forma, las unidades A-2, B-2, C-2 y D-2 corresponden a una siguiente unidad central, infrayacente a la unidad formada por A-3, B-3, C-3 y D-3. Finalmente en la sección superior se encuentra la unidad conformada por A-4, B-4, C-4 y D-4.

Al aplicar las funciones discriminantes se tomó en consideración que cuando el porcentaje de casos correctamente clasificados dentro de un grupo de unidades que se consideran una “unidad mayor” es bajo, indica que existe una buena correlación entre los pozos; mientras que un mayor porcentaje de casos correctamente clasificados indica que las unidades definidas en los pozos son diferentes entre sí.

5.10.1. Unidad química mayor U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1)

Para el grupo de unidades conformadas por A-1, B-1, C-1 y D-1 se realizó el gráfico de las funciones discriminantes utilizando todos los elementos químicos estudiados, que se aprecia en la figura 5.55.

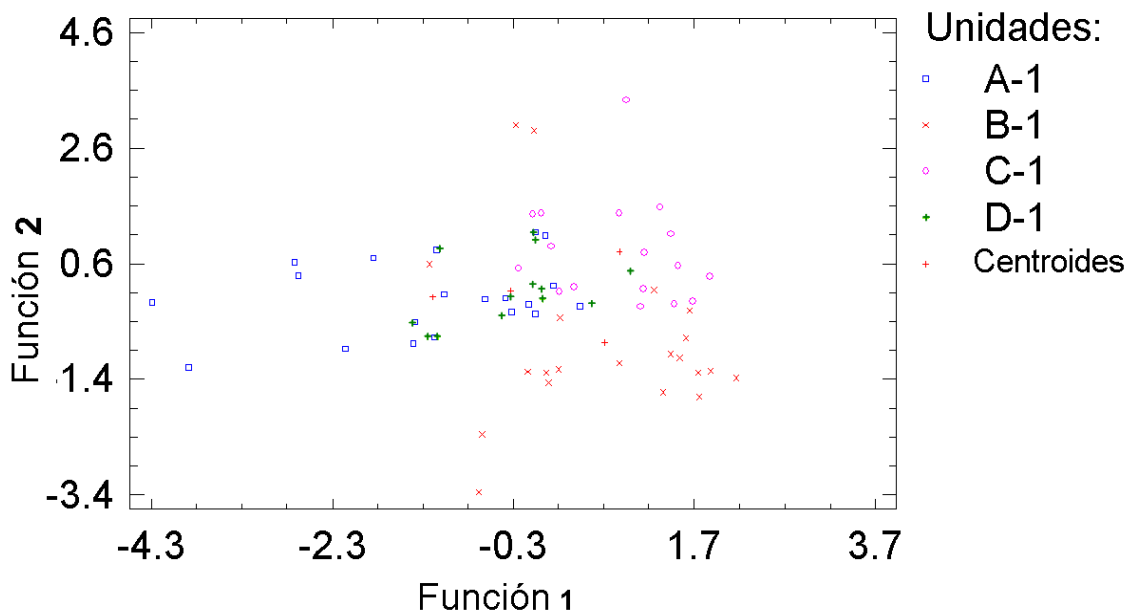


Figura 5.55. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-1, B-1, C-1 y D-1

Al observar la tabla 5.17 que muestra los casos correctamente agrupados, se observa que existe una similitud para esta unidad entre los pozos A y D ya que presentan una proporción baja de muestras correctamente separadas; igualmente los pozos B y C exhiben el mismo comportamiento, mostrando un solapamiento con las unidades de los pozos A y D. De esta forma se puede suponer que estas unidades corresponden con una unidad mayor en la base de la secuencia estudiada.

Tabla 5.17. Clasificación de las muestras para la unidad U-1

Grupo actual	Número de muestras	Grupos de predicción			
		Unidad A-1	Unidad B-1	Unidad C-1	Unidad D-1
Unidad A-1	21	11 (52.38%)	0	2 (9.52%)	8 (38.10%)
Unidad B-1	24	1 (4.16%)	19 (79.17%)	3 (12.5%)	1 (4.16%)
Unidad C-1	17	0	3 (17.65%)	14 (82.35%)	0
Unidad D-1	16	5 (31.25%)	0	1 (6.25%)	11 (68.75%)
Casos correctamente clasificados: 72.60%					

5.10.2. Unidad química mayor U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2)

Evaluando esta unidad se puede considerar que existe una buena relación entre las unidades A-2, B-2, C-2 y D-2 que se confirma al observar la figura 5.56. En esta figura se representan las funciones discriminantes realizadas a partir de todos los elementos químicos estudiados.

Igualmente al observar la tabla 5.18 se encuentra que el bajo porcentaje de muestras correctamente clasificadas para este grupo de unidades evidencian una pobre separación entre todas las unidades, lo cual significa que existe una relación directa entre ella.

Una de las mejores agrupaciones sería para los pozos A y D mostrando que existe una correlación entre estas unidades, seguido después por los pozos B y C que de la misma forma exhiben la buena relación entre ellos. Por lo cual se puede señalar que esta unidad 2

de todos los pozos podría corresponder a una unidad de mayor extensión que se extiende a través todos los pozos.

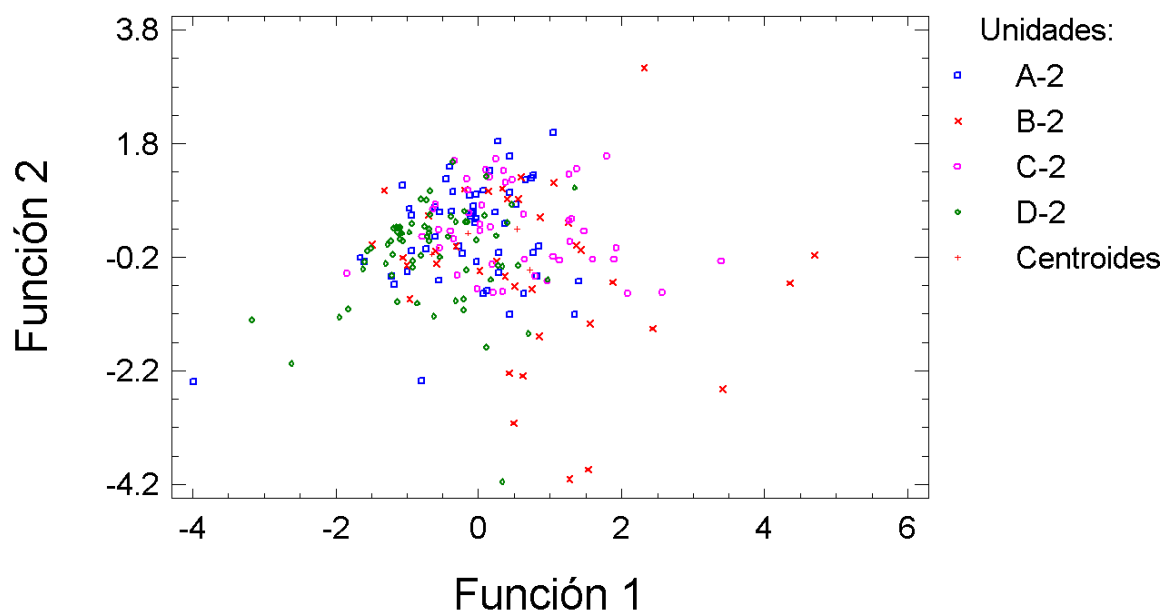


Figura 5.56. Representación gráfica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-2, B-2, C-2 y D-2

Tabla 5.18. Clasificación de las muestras para la unidad U-2

Grupo actual	Número de muestras	Grupos de predicción			
		Unidad A-2	Unidad B-2	Unidad C-2	Unidad D-2
Unidad A-2	54	22 (40.74%)	9 (16.67%)	10 (18.52%)	13 (24.07%)
Unidad B-2	48	7 (14.58%)	22 (45.84%)	12 (25%)	7 (14.58%)
Unidad C-2	57	16 (28.07%)	16 (28.07%)	20 (35.09%)	5 (8.77%)
Unidad D-2	66	21 (31.82%)	7 (10.61%)	4 (6.06%)	34 (51.52%)
Casos correctamente clasificados: 43.63%					

5.10.3. Unidad química mayor U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3)

En la figura 5.57 se puede observar como la unidad 3 de los pozos A y D se encuentran completamente solapadas, mientras que para las unidades B y C se muestra un leve solapamiento entre ellas y con el grupo que conforman los pozos A y D.

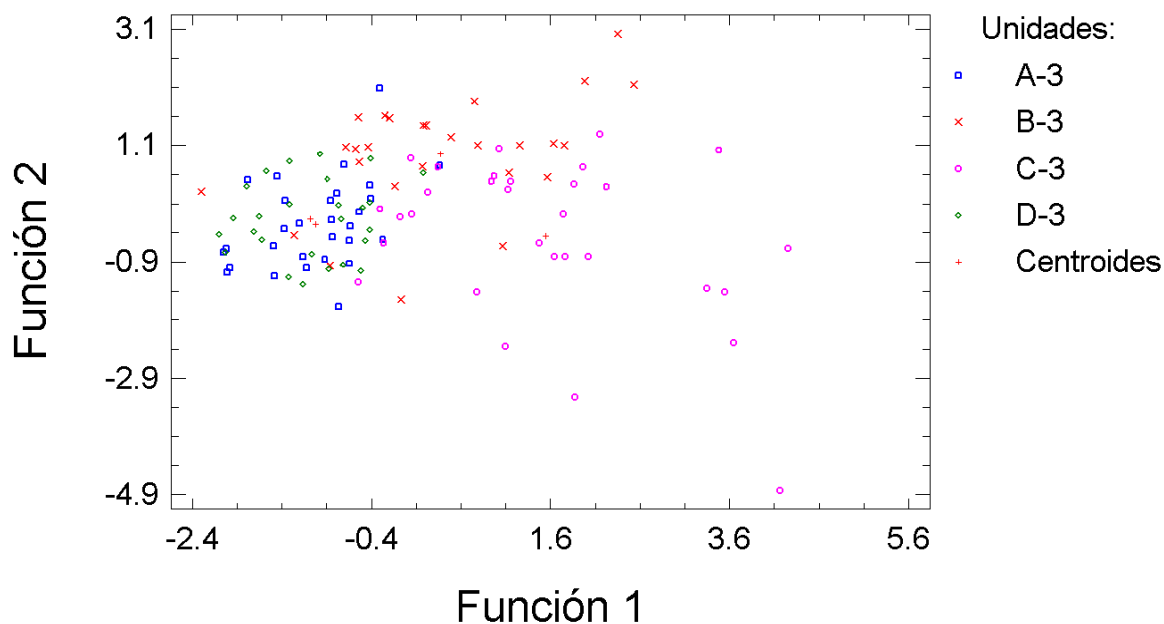


Figura 5.57. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-3, B-3, C-3 y D-3.

En la tabla 5.19 se muestra como la mayor separación de estas unidades la presenta el pozo C, lo que se reafirma en la figura 5.57. Este comportamiento es seguido por la unidad del pozo B que se diferencia solamente por una agrupación.

Por el contrario para los pozos A y D la situación es diferente ya que presentan una buena agrupación entre ellos. Lo mencionado anteriormente hace pensar que esta unidad 3 se puede encontrar a lo largo de los cuatros pozos, aunque los pozos ubicados hacia el oeste son más parecidos entre sí mientras los ubicados en la parte este exhiben mayores variaciones.

Tabla 5.19. Clasificación de las muestras para la unidad U-3

		Grupos de predicción			
Grupo actual	Número de muestras	Unidad A-3	Unidad B-3	Unidad C-3	Unidad D-3
Unidad A-3	29	21 (72.41%)	2 (6.90%)	0	6 (20.69%)
Unidad B-3	33	3 (9.09%)	24 (72.72%)	3 (9.09%)	4 (12.12%)
Unidad C-3	31	3 (9.68%)	7 (22.58%)	18 (58.06%)	5 (9.68%)
Unidad D-3	33	10 (30.30%)	2 (6.06%)	0	21 (63.64%)
Casos correctamente clasificados: 67.26%					

5.10.4. Unidad química mayor U-4 (A-4, B-4, C-4 y D-4)

En la figura 5.58 se pudo observar como para estas unidades existe una alta separación entre las mismas. Entre los cuatro pozos evaluados sólo se presenta un leve solapamiento entre las unidades 4 de A y C. En la tabla 5.20 se puede observar los altos valores para los casos correctamente clasificados alcanzados por este grupo de unidades que indican muy poca correlación entre ellos.

Para los pozos A, B y D las muestras se encuentran 100% bien clasificadas para las unidades correspondientes, mientras que el pozo C presenta una leve agrupación con el pozo A. Debido a estos resultados se puede decir que estas unidades son diferentes entre sí. Para descartar la posible correspondencia de las unidades 4 con unidades inferiores se procedió a realizar funciones discriminantes, las cuales se muestran en las figuras 5.58 hasta la 5.62.

En estas figuras se observó correlación con otras unidades inferiores, lo cual posiblemente se debe al poco espesor que posee, insuficientes muestras para definir la unidad correctamente y luego ser correlacionada, o ser unidades completamente diferentes.

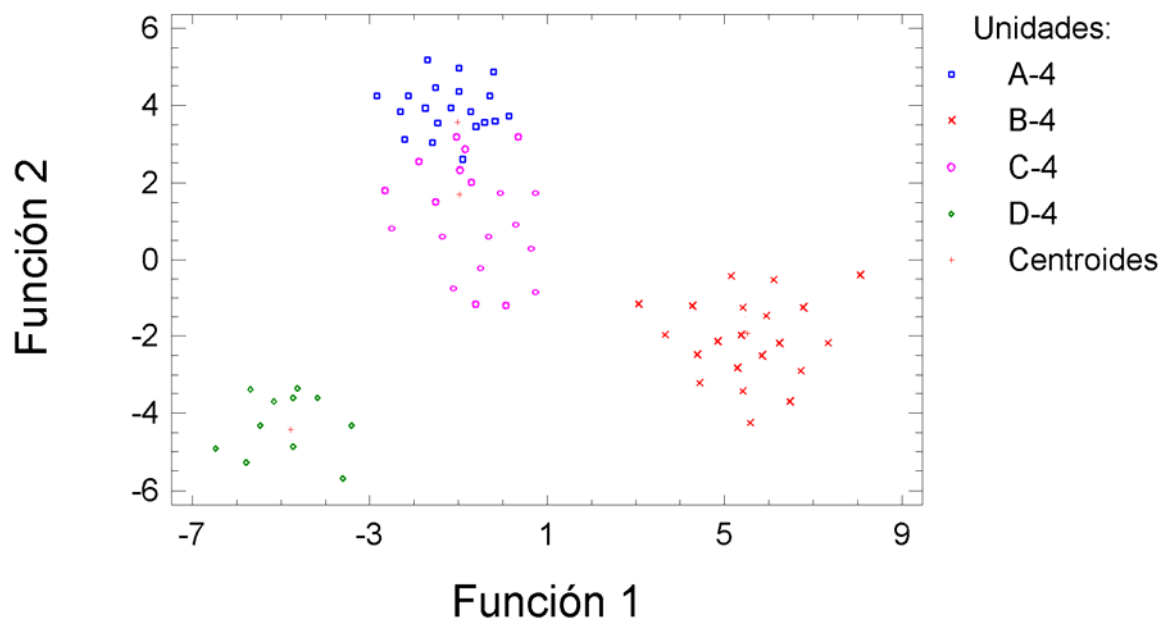


Figura 5.58. Representación grafica de las funciones discriminantes correspondiente a las unidades conformada por las unidades A-4, B-4, C-4 y D-4.

Tabla 5.20. Clasificación de las muestras para la unidad U-4

		Grupos de predicción			
Grupo actual	Número de muestras	Unidad A-4	Unidad B-4	Unidad C-4	Unidad D-4
Unidad A-4	19	21 (100%)	0	0	0
Unidad B-4	21	0	21 (100%)	0	0
Unidad C-4	24	5 (20.83%)	0	19 (79.17%)	0
Unidad D-4	11	0	0	0	11 (100%)
Casos correctamente clasificados: 94.91 %					

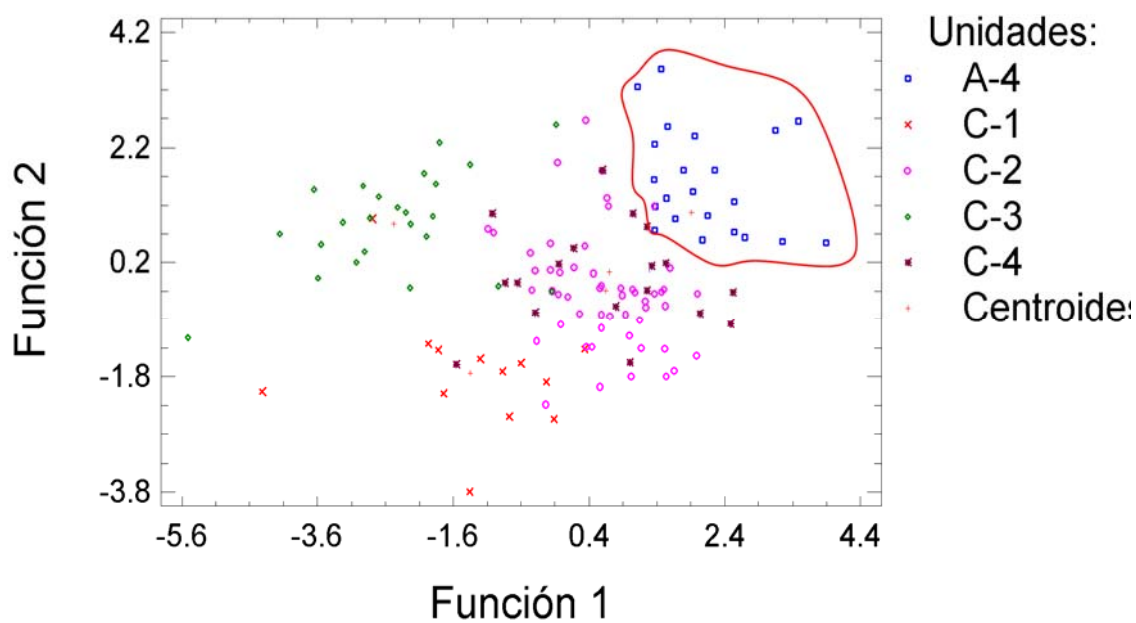


Figura 5.59. El grafico muestra como la unidad A-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo C, comportamientos similares presenta para los pozos B y D.

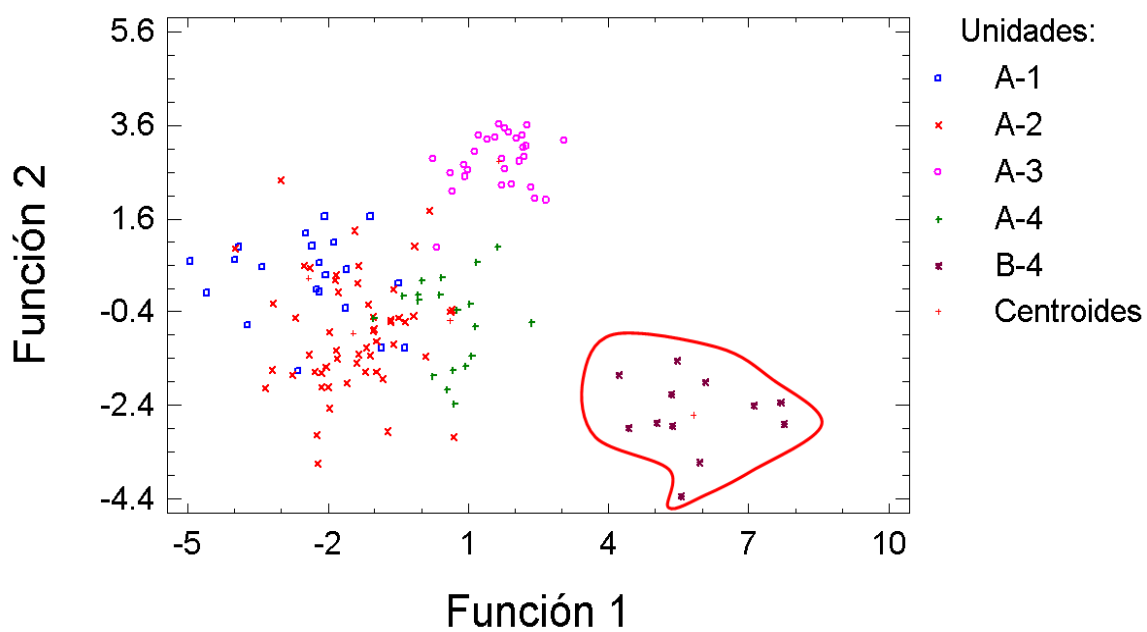


Figura 5.60. El grafico muestra como la unidad B-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo A, comportamientos similares presenta para los pozos C y D.

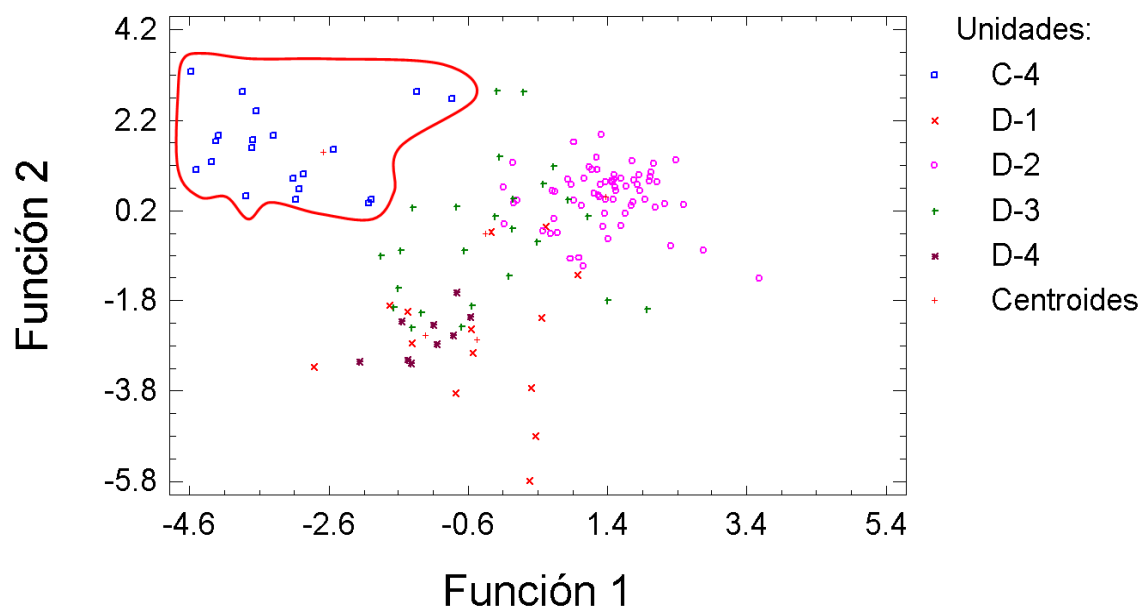


Figura 5.61. El grafico muestra como la unidad C-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo D, comportamientos similares presenta para los pozos A y D.

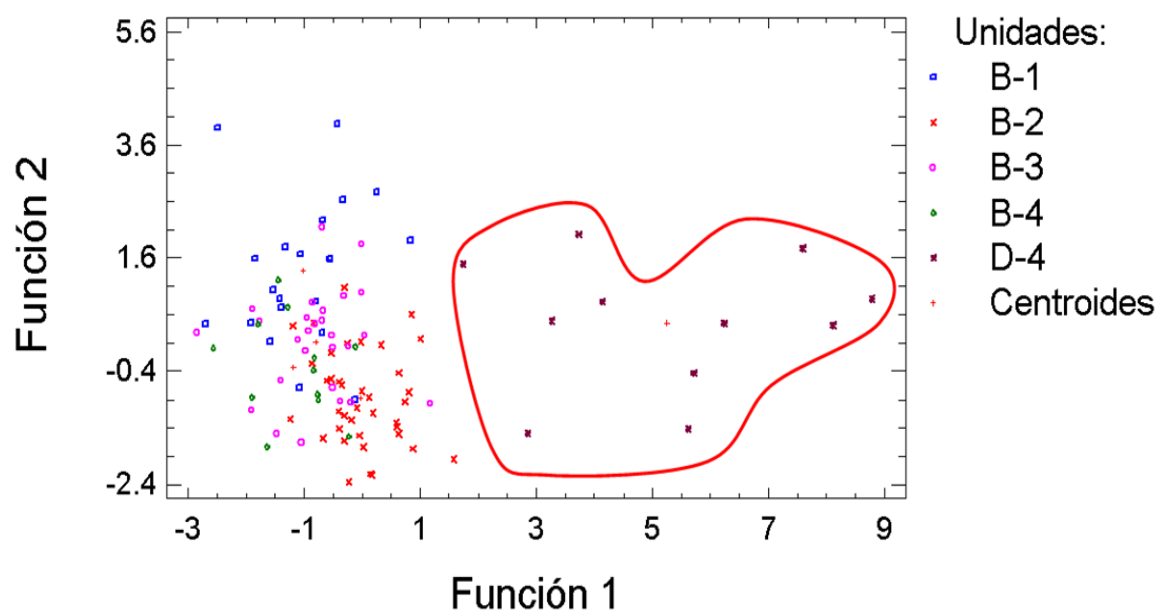


Figura 5.62. El grafico muestra como la unidad D-4 no corresponde con ninguna de las unidades del pozo B, comportamientos similares presenta para los pozos A y D.

5.11. Definición de unidades químicas mayores

Después de definir la correlación existente entre las unidades químicas presentes en cada pozo así como su continuidad lateral a través de la zona en estudios, se procedió a definir a la separación entre estas unidades de una forma general y de esta manera comprender la división vertical entre las mismas.

Para llevar esto a cabo, se realizó la agrupación de todas las unidades que se consideran correlacionables entre sí, según el punto desarrollado anteriormente. Por ejemplo: la unidad denominada U-1 corresponde a la suma de las unidades A-1, B-1, C-1 y D-1, de la misma forma se efectuó para las unidades U-2, U-3 y U-4.

La figura 5.63 es la representación grafica de las funciones discriminantes realizadas entre las tres unidades químicas mayores que se consideraron continuas lateralmente entre los pozos. En el mismo se puede apreciar como estas unidades poseen una buena separación con un porcentaje alto de muestras correctamente clasificadas, por encima del 90% las cuales se observan en la tabla 5.21. El suave solapamiento observado de las unidades posiblemente corresponde con algunas características químicas similares.

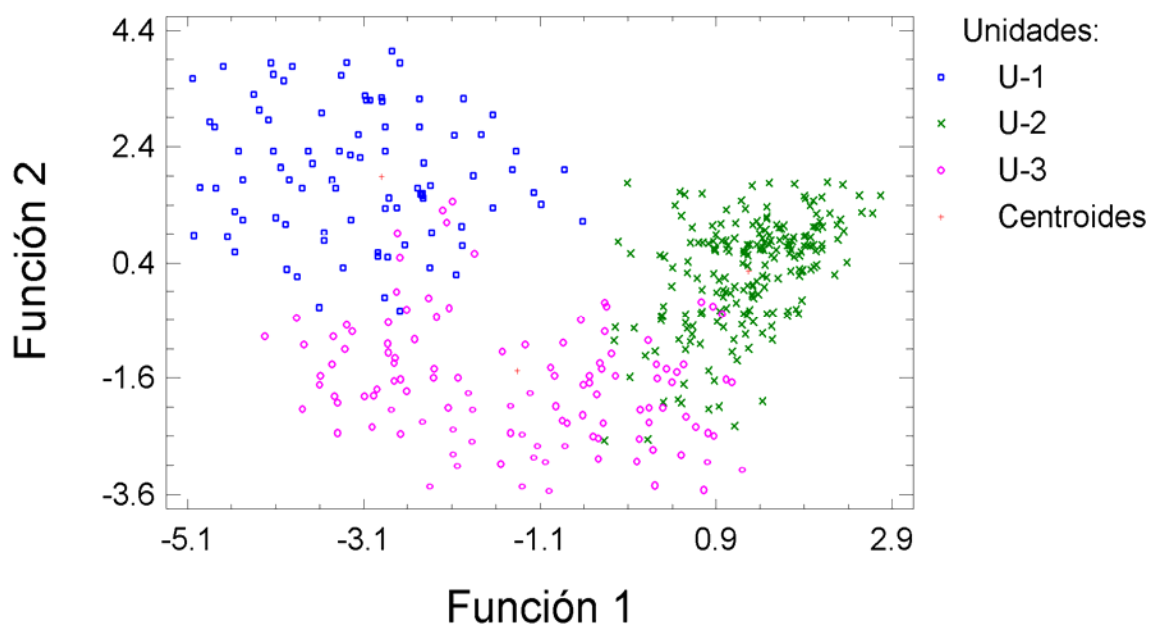


Figura 5.63. El grafico se muestra la separación existe entre las tres unidades químicas mayores U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1), U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2) y U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3) que se definieron como correlacionables entre sí.

Tabla 5.21. Clasificación de las tres unidades químicas mayores definida en el área

Grupos de predicción				
Grupo actual	Número de muestras	Unidad U-1	Unidad U-2	Unidad U-3
Unidad U-1	78	71 (91.03%)	0	2 (2.56%)
Unidad U-2	225	0	209 (92.89%)	16 (7.11%)
Unidad U-3	128	10 (8.31%)	8 (6.34%)	108 (85.35%)
Casos correctamente clasificados: 91.22%				

Para la unidad química mayor U-4 formada por las A-4, B-4, C-4 y D-4 se realizó el gráfico de las funciones discriminantes conjuntamente con las tres unidades definidas, donde se pudo demostrar la dispersión que muestra esta unidad U-4, reafirmando que esta unidad no posee correlación con las unidades U-1, U-2 y U-3 (figura 5.64).

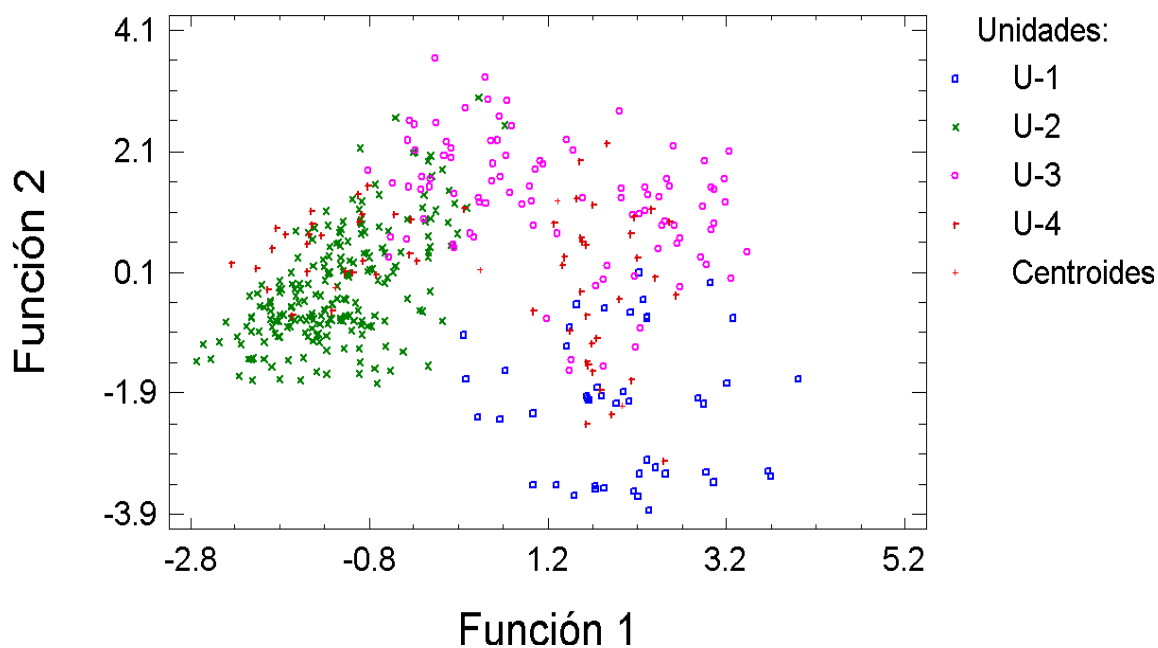


Figura 5.64. El gráfico se muestra la separación que existe entre las cuatro unidades químicas mayores U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1), U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2), U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3) y U-4 (A-4 B-4, C-4 y D-4).

Tabla 5.22. Clasificación de las tres unidades químicas mayores definida en el área conjuntamente con la posible unidad U-4

		Grupos de predicción			
Grupo actual	Número de muestras	Unidad U-1	Unidad U-2	Unidad U-3	Unidad U-4
Unidad U-1	78	65 (83.33%)	1 (1.28%)	2 (2.57%)	10 (12.82%)
Unidad U-2	225	0	199 (88.45%)	14 (6.22%)	12 (5.33%)
Unidad U-3	126	5 (3.97%)	4 (3.17%)	101 (80.16%)	16 (12.70%)
Unidad U-4	75	11 (14.67%)	27 (36.00%)	4 (5.33%)	33 (44.00%)
Casos correctamente clasificados: 79.61 %					

En el anexo N° 20 se muestra una representación esquemática idealizada de la correlación propuestas entre los cuatros pozos que son evaluadas dentro del trabajo de investigación, en el cual se muestra la continuidad lateral de las unidades y su continuidad en toda el área. Esta figura fue elaborada considerando los resultados obtenidos a partir de los perfiles verticales que se muestran en la figura 5.65 correspondientes a cada pozo, con cuyos resultados permitieron generar las funciones discriminantes obtenidas para cada unidad de los cuatro pozos que posteriormente fueron introducidas en cada ecuación los valores de cada elemento de las muestras correctamente clasificada.

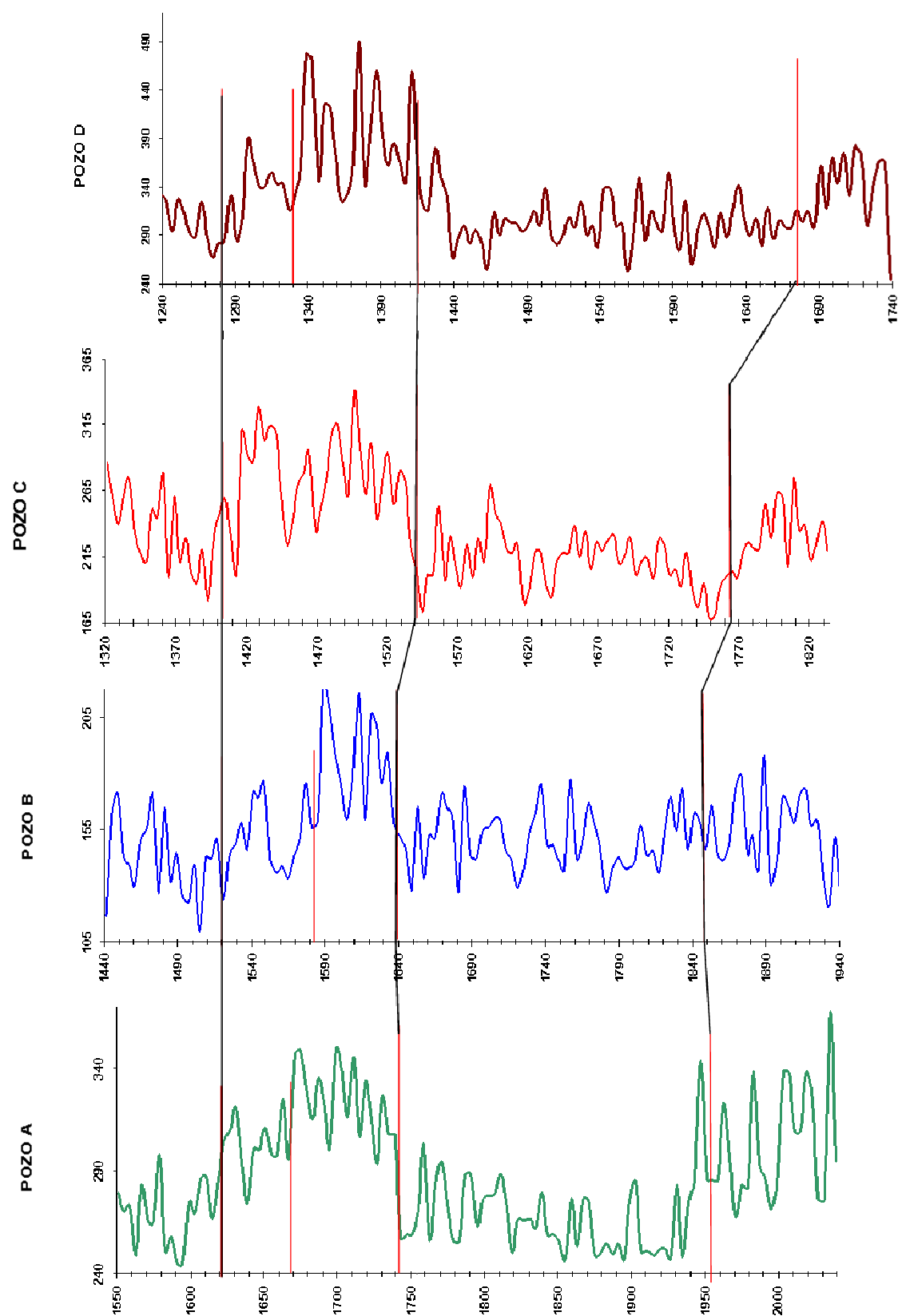


Figura 5.65. El gráfico muestra los perfiles verticales generados para los cuatro pozos estudiados a partir de las funciones discriminantes generadas para cada unidad definidas.

5.12. Alcances y limitaciones del perfil de espectroscopía elemental

Después de realizar los distintos análisis estadísticos que permitieron efectuar una caracterización química del área de estudio a través de los cuatro pozos, de los cuales se contaba con información suficiente, se pudo establecer los alcances del perfil de espectroscopía elemental que generó la información empleada en este trabajo, así como también sus limitaciones para este tipo de estudio.

5.12.1. Alcances

- Este tipo de perfil permite obtener la composición de trece elementos químicos mayoritarios, las cuales muestran cambios y quiebres dentro de sus perfiles verticales que permiten establecer tendencias químicas dentro de un pozo, lo cual ayuda a definir unidades químicas.
- La resolución vertical de esta herramienta de 2' (60 cm) permite obtener de una manera rápida, continua y sistemática un análisis de las formaciones atravesadas por el pozo, controlando con mayor precisión la ubicación estratigráfica de las muestras, que permite superar las limitaciones del muestreo conseguidas en los trabajos quimioestratigráficos tradicionales hechos con muestras de pared, núcleos o ripios.
- Así mismo la determinación de unidades químicas que se logren definir a lo largo de toda un área, permite establecer correlación entre ellas ofreciendo un aporte adicional a las informaciones litoestratigráficas y bioestratigráficas que se posean.
- Los datos obtenidos del perfil de espectroscopía elemental permite realizar clasificaciones geoquímicas, como la de HERRON (1988) empleada dentro de este trabajo, así otras como la de BATHIA (1983), PEMPER *et al.* (2006) entre otros.

5.12.2. Limitaciones

- Ya que la resolución vertical de este tipo de perfil es de 2' (60,69cm) se encuentra limitada a la hora de evaluar estratos de espesores menores a su resolución.
- Los elementos Ca, S, Mg y Fe se pueden encontrar afectados por los fluidos de perforación en formaciones porosas.
- En litologías que poseen porcentajes en pesos menores al 0,1% de los elementos Ti y Mn; la herramienta de espectroscopía elemental presentó alta dispersión debido a que estos valores se encuentran por debajo de los límites de detección de la tecnología.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Para la secuencia miocena estudiada en los cuatro pozos (A, B, C y D) se consiguió definir cuatro unidades químicas mayores en cada uno de ellos. De igual forma dentro de la unidad 3 de los pozos A, B y D se logró delimitar dos subunidades químicas, exceptuando el pozo C donde no se lograron diferenciar con claridad estas subunidades.
- En la Formación Oficina las unidades químicas responden a litologías y mineralogías propias las cuales se encuentran definidas y delimitadas por cambios de las concentraciones de los elementos químicos: Si, Al, Fe, Th, K, U, Ca, Gd, Ti, Mg, Mn y S.
- En el área de estudio se logró establecer la correlación entre tres de las unidades químicas mayores definidas en todos los pozos, donde su disposición dentro de toda la zona respeta el orden estratigráfico normal. En la parte inferior de los cuatro pozos se encontró la correlación entre las unidades A-1, B-1, C-1 y D-1 la cual se definió como U-1, en la parte central A-2, B-2, C-2 y D-2 se renombró como U-2, y las unidades A-3, B-3, C-3 y D-3 como U-3.
- Con las unidades ubicadas en la parte superior de todos los pozos (A-4, B-4, C-4 y D-4) no se logró establecer correlación entre ellas; el motivo de esto se puede encontrar relacionado con varias causas como son: no se tomó para el estudio suficientes muestras de las unidades 4 de cada pozo para discriminarlas adecuadamente; puede tratarse de unidades químicas diferentes o unidades diferentes que se acuñan.
- Las unidades químicas mayores que presentan una continuidad lateral en todo el área estudiada en el trabajo de investigación son: para la unidad U-1 en el pozo A dentro de

las profundidades de 2039' – 1959' (621,5 - 597,1 m), en el pozo B 1941' – 1849' (591,6 - 563,6 m), en el pozo C 1933' – 1769' (589,2 – 539.19,1 m) y en el pozo D 1739' – 1679' (530,1 – 511,8 m). La unidad U-2 en el pozo A se encuentra en las profundidades de 1955' – 1743' (595,9 – 530,1 m), en el pozo B 1845' – 1657' (621,5 – 597,1 m), en el pozo C en las profundidades de 1765' – 1541' (538 – 469,7 m), y en el pozo D se encuentra en 1675' – 1415' (510,5 – 431,3 m). La unidad U-3 se encuentra en las profundidades de 1739' – 1627' (530,1 – 495,9 m) para el pozo A, para el pozo B se encuentra en 1635' – 1525' (498,3 – 464,8 m), para el pozo C en las profundidades de 1537' – 1417' (468,5 – 431,9 m) y en el pozo D está en 1411' – 1283' (430,1 – 391,1 m).

- La unidad U-1 (A-1, B-1, C-1 y D-1) se caracteriza en general por poseer Si con valores promedios de 29%, Al en un 7,5%, Fe 2,5%, Th es de 10ppm y K de 1%. En la unidad U-2 (A-2, B-2, C-2 y D-2) los promedios elementos son: Si de un 33%, Al de 3,5%, Fe tiene un 1,8%, el Th son 6ppm y el K posee un 1%. La unidad U-3 (A-3, B-3, C-3 y D-3) se caracteriza por poseer Si de 28%, Al de 6%, el Fe tiene un 3,5%, el Th se tiene 10ppm y el K posee un 1,2%.
- Mediante los resultados obtenidos de los métodos estadísticos aplicados a los resultados de los análisis de fluorescencia de rayos X, en específico los gráficos de frecuencia acumulada, se pudo verificar la buena coherencia existente entre las mediciones obtenidas por el perfil de espectroscopía elemental que fue utilizado en este trabajo de investigación, aunque al realizar una comparación entre los valores, se demuestra un diferencia en los porcentajes presentes.
- Dentro del trabajo se pudo establecer según el esquema de clasificación de rocas sedimentarias de HERRON (1988) que en el pozo A, las litologías más abundantes son litarenitas, sublitarenitas, subarcosas y cuarzoarenitas. Un comportamiento semejante se observó para el pozo D mostrando el mismo tipo de litologías en general, mientras que para los pozos B y C se obtuvo que las litologías más abundantes fueron lutitas, lutitas-Fe, wackas, litarenistas, y sublitarenitas. Para el pozo A se contó con 13

petrográfias realizadas a muestras de pared tomadas a distintas profundidades, las cuales se encontraban impregnadas de petróleo por lo cual no presentaban las características originales de la formación, encontrándose 9 cuarzoarenitas, 3 arcosas y una litarenita según la clasificación de PETTIJOHN (1987).

- Al momento realizar la correlación entre las unidades químicas mayores definidas dentro del área, se pudo establecer que los elementos que permitían una mejor relación entre los pozos fueron: Si, Al, Fe, Th, K, U, Mg y Gd.
- Los métodos estadísticos empleados dentro de este Trabajo permitieron realizar satisfactoriamente una caracterización química a partir de los elementos disponibles. Los métodos estadísticos univariantes como los histogramas y los diagramas de caja permitieron manejar un conocimiento de las variables de forma general dentro de pozo así como para las unidades químicas definidas, igualmente los métodos estadísticos multivariantes ayudaron a corroborar los límites de las unidades.
- El principal aporte de este Trabajo Especial de Grado es comprobar la eficiencia de los perfiles de espectroscopía elemental al momento de la realización de un estudio quimioestratigráficos y de caracterización química, donde este tipo de herramientas permiten un muestreo completo y sistemático del pozo, minimizando las limitaciones asociadas al muestreo de secciones incompletas y teniendo un mejor control sobre la ubicación espacial de las muestras. Adicionalmente permite el ahorro de tiempo en el procesamiento de las muestras ya que posee una correcta correspondencia entre las mediciones hechas por el laboratorio y las tomadas por la herramienta.
- Para la zona en estudio se permitió establecer de forma independiente de la litología una correlación entre los cuatro pozos a partir de la información química obtenida de la herramienta de espectroscopía elemental.
- La principal limitación de esta tecnología es su resolución vertical de 2 pies por lo cual no se puede muestrear con mayor frecuencia para análisis de alta resolución. Así

mismo el perfil realiza el análisis de un volumen de la roca y no de una zona en particular.

- Otro aporte significativo de este trabajo estuvo en demostrar la aplicabilidad de los estudios quimioestratigráficos y técnicas estadísticas para caracterizaciones geoquímicas como una herramienta complementaria para estudios estratigráficos, representando una alternativa a las correlaciones bioestratigráficas y litoestratigráficas.
- Este trabajo corresponde con un estudio pionero en una zona petrolífera de gran importancia para Venezuela, como lo es La Faja Petrolífera del Orinoco; en la cual no existía ningún tipo de datos de geoquímica inorgánica. Se comprobó que es posible efectuar relaciones químicas entre pozos y es posible relacionar estas variaciones químicas a cambios en procesos geológicos; y en general, conocer mejor la geología de esta área de gran interés nacional.

6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de difracción de rayos X que permitan relacionar los resultados químicos obtenidos con la tecnología de espectroscopía elemental y los cambios mineralógicos y estratigráficos de la secuencia estudiada; esto permitiría mejorar la definición de las unidades químicas del área estudiada.
- Con estos estudios mineralógicos también se podrían mejorar las caracterizaciones de las litologías reconocidas en los pozos A, B, C y D, definidas mediante la clasificación de rocas propuesta por HERRON (1988). Adicionalmente se pudieran realizar clasificaciones mineralógicas que permitan estimar la composición de la formación, al menos de forma general, de las secuencias perfiladas.
- Ejecutar estudios similares en pozos cercanos que posean estos perfiles de espectroscopía elemental con la finalidad de establecer unidades químicas y verificar si existe extensión regional de alguna de ellas que ayuden a realizar correlaciones entre pozos independientemente a previos trabajos litoestratigráficos y bioestratigráficos.
- Para incrementar la correspondencia entre los valores suministrados por el perfil de espectroscopía elemental con los obtenidos por los análisis de fluorescencia de rayos X, se debe desarrollar un algoritmo matemático.

BIBLIOGRAFÍA

- ALTUNA, A. 2006. *Caracterización química y radiométrica de diversos niveles de los pozos MAC-1X, MAC-2X Y PIC-25, norte del Estado Monagas*. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología. 125 p.
- ARIAS, I. 2004. *Estudio de minerales de arcilla presentes en muestras de sedimentos superficiales y núcleos de la fachada atlántica venezolana*. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 137p.
- ARIZA, M. 2006. *Caracterización quimioestratigráfica del límite eoceno – oligoceno de la zona surcentral de la cuenca de FALCÓN*. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 142 p.
- ARMAS, J. M., 1998. *Estadística Sencilla Descriptiva*. Departamento de Estadística, Universidad de Los Andes. Mérida. 236p.
- AUDEMARD, F., AZPIRITXAGA, I., BAUMANN, P., ISEA, A. & M. LATREILLE. 1985. Marco Geológico del Terciario de la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela. *Memorias VI Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, 1985, 1:70-108.
- BHATIA M. & CROOK, K. 1986 *Trance element characteristics of grawackes and Tectonic discrimination of sedimentary basic*: Contrib. Mineral. Petrol., v. 92, p 181-193.
- BAVUTTI, M. 2006. *Caracterización química de una sección de la formación aguardiente, edo. Táchira*. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 142 p.
- BEJARANO, C. 2006. *Tertiary Stratigraphy and Sedimentary Environments of the Oil Bearing Sands of the Orinoco Oil Belt, Venezuela, South America*. Ponencia presentada en: 1st Heavy Oil Conference. 7p.
- BRICEÑO H. & A. CALLEJÓN. 2000. Chemostratigraphic correlation of the source rock in the La Luna – K/T petroleum system in Southwestern Venezuela. En: *Research*

- conference. Paleogeography and hydrocarbon potential of the La Luna Formation and related cretaceous anoxic system.* SEPM, Caracas, Edición en CD.
- CHACÍN, C. 2003. *Caracterización química y radiométrica de muestra de canal correspondientes a cuatro pozos del campo petrolífero La Concepción, estado Zulia.* Trabajo Especial de Grado, Inédito. Dpto. de Geología, UCV, 254 p.
- CAMPOSANO L. & N. MARTÍNEZ. 2000. *Caracterización química y radiométrica de secciones estratigráficas de las formaciones Barco y Mirador. San Pedro del Río. Edo. Táchira.* Trabajo Especial de Grado, Inédito. Dpto. de Geología, UCV, 245 p.
- CEDILLO J. & OLAYA W. 2003. *Caracterización química y radiométrica de sedimentos de una zona ubicada al noreste del delta del río Orinoco en el océano Atlántico, Venezuela.* Geos (UCV Caracas) 36: 77 + 195 p. en CD.
- DAVIS J. C. 1973. *Statistics and Data Analysis in Geology.* Wiley and Sons, New York, 550 p.
- DI CROCE, J. *et al.* 1999. Sequence Stratigraphy of the Eastern Venezuelan Basin. En MANN, P. (ed) *Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the world*, 4. Elsevier Science B.V., Amsterdam. 419-476 p.
- DRAPER, N.F. and Smith, H., 1966, *Applied Regression Analysis*, John Wiley & Sons, pp. 44-85.
- DUGARTE, J. 2008. *Estudio estratigráfico de la secuencia oligo-miocena aplicando registros de alta tecnología.* Tesis en proceso. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 222p
- GONZÁLEZ DE JUANA, J., ITURRALDE, J. & X. PICARD. 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas.* Caracas. Ediciones Foninves, V.2, 1031p, 620 p.
- GONZÁLEZ, L & G. SÁNCHEZ. 2001. *Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la formación la luna, en el Estado Táchira.* Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 232p.
- HOEL, P.G., Port, S.C., and Stone, C.J., 1971, *Introduction to Statistical Theory*, Houghton Mifflin, pp. 121-127.

- KEYHOLE INC. & GOOGLE. 2008. *GOOGLE EARTH*. Versión 4.3 (8 de Julio de 2008). Programa en línea. Sitio web: earth.google.com. Consulta: Agosto – Septiembre 2008.
- LEAL, F & O. RIVERO. 2004. *Estudio de litofacies y quimioestratigrafía de la sección superior de la formación el paraíso como herramienta para determinar posibles características de potencialidad generadora y/o almacenadora de hidrocarburos en la sección en la sección geológica de Río Paraíso*. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 196p.
- LOFTS, J.C., 1993, “*Integrated Geochemical-Geophysical Studies of Sedimentary Reservoir Rocks*,” Ph.D. Dissertation, University of Leicester, Department of Geology,
- MARGOTTA, J. 2004. *Caracterización quimioestratigráfica de la sección basal de la Formación Querecual, Isla de Chimana Grande, Estado*. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 142p.
- MONTERO, J. 2007. *Aplicación de métodos multivariados para identificar y correlacionar quimiofacies en la formación cerro pelado (mioceno), edo. Falcón*. Instituto de Ciencias de la Tierra, Escuela de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- NITON UK-PORTABLE XRF ANALYSIS AND SORTING 2008. *Niton Uk limited and its licensors*. <http://www.nitonuk.co.uk/info/xrf.php>. Consulta 25 julio 2008.
- NORTH C. & M. BOERING. 1999. *Spectral Gamma Ray jogging for facies discrimination in mixed fluvial – eolian succesions*. A cautionary tale. *AAPG Bulletin*, 83(1): 155 – 169p.
- PARNAUD, F., GOU I., PASCAL J.C., TRUSKOWSKI I., GALLANGO O. PASSALACQUA H. & F. ROURE, 1995. Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin. *En: TANKARD, A., SUAREZ, R. & WELSINK, H. Petroleum Basins of South America*. (Eds.). American Association of Petroleum Geologist, Memoir 62. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 741-756 p.
- PEMPER, R., SOMMER, A., GUO, P., JACOBI, D., LONGO, J., BLIVEN, S., RODRIGUEZ, E., MENDEZ, F. & X. HAN. 2006. A New Pulsed Neutron Sonde for Derivation of Formation Lithology and Mineralogy. *2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE. San Antonio, TX. USA. 13p.

- PEARCE, T; BESLY, B; WRAY, D & WRIGHT, D 1998. *Chemostratigraphy: a method to improve interwell correlation in barren sequences – a case study using onshore Duckmantian/Stephanian sequences (West Midlands, U.K.)*. *Sedimentary Geology*, (124): 197-220.
- RAYMOND, L. 1997. *The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphics rocks*. México D.F. International Thompson Editores, 675 pp.
- ROLLINSON, H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical. New York. 352 pp.
- YARINCIK K. & R. MURRAY. 2000. *Climatically sensitive eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578.000 years: Results from Al/Ti and K/Al*. *Paleoceanography*, 15(2): 210-228.
- YORIS F., M. OSTOS & L. ZAMORA. 1997. *Petroleum Geology of Venezuela*. En SCHLUMBERGER SURENCO C.A. *Venezuela WEC 1997 Well Evaluation Conference*. Jolley Printing Inc, Houston, Cap I. p. 1-44.