

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**QUIMIOESTRATIGRAFIA Y GEOQUÍMICA SEDIMENTARIA  
EN UNA SECCIÓN DE LA FORMACIÓN EL PARAÍSO,  
QUEBRADA PURURECHE, CUENCA DE FALCÓN,  
VENEZUELA.**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Licenciada María Fernanda  
Romero Sarmiento para optar al  
Título de Magíster Scientiarum en  
Ciencias Geológicas.**

**Caracas, 2007**

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### ***QUIMIOESTRATIGRAFIA Y GEOQUÍMICA SEDIMENTARIA EN UNA SECCIÓN DE LA FORMACIÓN EL PARAÍSO, QUEBRADA PURURECHE, CUENCA DE FALCÓN, VENEZUELA.***

Tutor Académico: Dr. Manuel Martínez

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Licenciada María Fernanda  
Romero Sarmiento para optar al  
Título de Magíster Scientiarum en  
Ciencias Geológicas.

Caracas, 2007

© Romero Sarmiento, Maria Fernanda 2007

Hecho el Depósito de Ley.

Depósito Legal No. Ift4872007551202.

## DEDICATORIA

Hace un poco más de 2 años comprendí el verdadero sentimiento del amor.  
Llegó a mi vida una personita, que jamás me imagine que se podría amar tanto.

Esa personita, es mi hijo, mi *Carlos Alfredo*. Sólo Dios sabe cuanto te amo.  
Eres mi pasión, mi esperanza, mi alegría, mi todo. Gracias por existir mi bebe y a ti te  
dedico todo el esfuerzo que representó la culminación de este trabajo.

*Te ama profundamente Tu Mami.*

Dios te dedico mi vida y sólo te pido que me des salud y me mantengas viva mientras  
mi hijo me necesite, quiero verlo crecer y alcanzar sus metas como yo las he  
alcanzado hasta ahora.



## AGRADECIMIENTOS

A mí adorada casa que vence las sombras, mi *Universidad Central de Venezuela*. Una vez más me permitiste seguir formándome como profesional y persona. Al proyecto de grupo del *CDCH No. 08.00.5646.2006* por financiar esta investigación.

A mi tutor *Dr. Manuel Martínez*, por escucharme, apoyarme y sobre todo guiarme a lo largo del desarrollo de este trabajo. Se te quiere y respeta. Gracias por la oportunidad de trabajar contigo y gracias por ser mi amigo.

A mi “jefa” *Dr. Olga Rey*, porque representaste una pieza fundamental durante el transcurso de mi postgrado. Fueron tantos los momentos compartidos, fuiste mi profesora, mi amiga, mi jefa, en fin, mi apoyo “geológico”. No tengo como agradecerte todo lo vivido.

Al laboratorio de *Geoquímica Orgánica*, porque allí conté con todo lo necesario para realizar mi tesis, desde los materiales y equipos, hasta los compañeros que hicieron mi estadía en la Facultad de Ciencias, lo más agradable posible. Por eso no puedo dejar de darle las gracias sinceramente al *Prof. José Vicente Gutiérrez*, por todo lo que me enseñaste y todo lo que me aguantaste. A todos los muchachos: *Jean Carlos, Angie, Carlitos, Nelson, Laura, Katya, Patricia, Maren, Adriana, Víctor, César, Laurita* (y perdónenme si me falta alguien); por todo lo compartido y lo vivido.

A uno de mis mejores amigos *Santiago*. Gracias por todo!!!! Me ayudaste tanto, desde abrirme la puerta del estacionamiento, compartir tu oficina conmigo, prestarme tu computadora, escuchar mis frustraciones. Realmente no se como me aguantaste tanto. A mis compañeros solidarios de almuerzo durante tanto tiempo. Gracias porque siempre conté con ustedes: *Marly, Libia, Morella y Luis Vilchez*. Los aprecio muchísimo.

La otra parte de mi corazón esta ocupada por mi nueva Facultad, Ingeniería, aquí no sólo desarrolle mi maestría, sino que conocí a personas tan importantes para mí, que por eso no puedo dejar de mencionarlas y agradecerles el apoyo, la solidaridad y todo lo que compartimos: Mi amiga *Dulcinea*, sabes que te quiero muchísimo. *Gustavo, Sandro, Lisbeth, Evelyn, Ana Maria, Eunice, Marielena, Ana, Yoreima, Maria Teresa, Analis, Marino, Morella, Maritza, Violeta*, que puedo decirles que ustedes no sepan, gracias infinitas por todo!

A mi *familia, mi papá, mi hermana y mi abuela* por ser mi motor y mi respaldo. A *Frank*, mi esposo, por todo el tiempo que hemos compartido, por tu apoyo y gracias infinitas por tu preocupación, hasta una impresora me regalaste!!!... Besos

Quiero agradecer especialmente a dos mujeres maravillosas que sin la ayuda invaluable de ellas, yo no hubiese podido culminar esta meta. Ellas son mi *mamá y mi tía política Clore*. Gracias eternamente a las dos, porque fueron muchas las horas que me ayudaron con mi Carlos Alfredo. No tengo como agradecerles todos los cuidados y atenciones que han tenido con mi hijo. De verdad gracias por ayudarme con la crianza de mi bebe. Siempre supe que estaba en buenas manos y de verdad sin ustedes no lo hubiese logrado. Las adoro.

Finalmente, gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma estuvieron involucradas con este trabajo como el *Prof. Ricardo Alezones y Maria Antonieta Ariza*. Así como el resto de mis *amigos* que siempre estuvieron pendientes de mí.

*Gracias a todos....*

*Mafer*

Romero S., María F.

**QUIMIOESTRATIGRAFIA Y GEOQUÍMICA SEDIMENTARIA  
EN UNA SECCIÓN DE LA FORMACIÓN EL PARAÍSO,  
QUEBRADA PURURECHE, CUENCA DE FALCÓN,  
VENEZUELA**

**Tutor Académico: Dr. Manuel Martínez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de  
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2007, 167 p.**

**Palabras Claves:** Quimioestratigrafía, Formación El Paraíso, Cuenca de Falcón, Estadística Multivariada, Quimiofacies

Con la finalidad de realizar interpretaciones en la geoquímica sedimentaria prevaleciente para el momento de la individualización de la cuenca de Falcón durante el inicio de la sedimentación del Oligoceno, se llevó a cabo un estudio de las variaciones estratigráficas en diferentes atributos químicos medidos en una sección de la Formación El Paraíso que aflora en la quebrada Purureche, en la región sur-central del estado Falcón.

Para ello, se estimó el comportamiento de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, a través de la interpretación de diferentes perfiles geoquímicos, en un muestreo de la unidad a intervalos de 50 cm. Aplicando el método de fusión alcalina y con la técnica EEO-IAP, se determinó la concentración de 20 elementos químicos (Al, Ba, Ca, Ce, Cr, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sc, Si, Sr, Ti, V, Y, Zn y Zr). Adicionalmente, mediante combustión seca se determinó el porcentaje de azufre y carbono total en las muestras pulverizadas.

A través del empleo de análisis de factores se proponen cinco asociaciones geoquímicas: clástica – arcillosa (Al, Ba, Ce, Cr, Cu, La, Pb, Sc, Sr, V, Y), carbonatos (Ca, Mg, Mn), clástica – arenosa (Si, Ti, Zr), sulfuros (Fe, Ni, S, Zn) y diagenética. De igual forma, aplicando análisis de agrupamiento restringido se plantea la existencia de 3 quimiofacies de proveniencia dentro de la secuencia sedimentaria analizada. Adicionalmente, se proponen 3 quimiofacies de carbonatos y 2 quimiofacies de sulfuros asociadas a procesos diagenéticos o post-diagenéticos.

Los diagramas de dispersión y las relaciones interelementales evidenciaron que la composición de los sedimentos que dieron origen a esta formación, caen dentro del campo félsico – metamórfico – intermedio. Por consiguiente, la interpretación global de los resultados permite proponer, que la fuente que pudo haber aportado los sedimentos que conforman esa sección de la Formación El Paraíso, fue una fuente tipo Cordillera de La Costa y rocas sedimentarias previamente depositadas (Cretáceo-Paleógeno).

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO I. INTRODUCCIÓN   | 1  |
| Objetivo General   | 2  |
| Objetivos Específicos.   | 3  |
| CAPITULO II. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO                         | 4  |
| CAPITULO III. FUNDAMENTO TEÓRICO                                   | 6  |
| Geoquímica   | 6  |
| Quimioestratigrafía  | 7  |
| Aplicaciones de la quimioestratigrafía                             | 8  |
| Análisis de composición de roca fuente (Proveniencia sedimentaria) | 8  |
| Análisis de condiciones redox                                      | 11 |
| Análisis de paleosalinidad   | 14 |
| Análisis de condiciones climáticas prevalecientes                  | 15 |
| Perfiles quimioestratigráficos y curvas de acumulación porcentual  | 16 |
| Estadística descriptiva  | 17 |
| Estadística multivariada   | 21 |
| CAPITULO IV. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL                              | 24 |
| Estratigrafía regional   | 34 |
| CAPITULO V. MARCO GEOLÓGICO LOCAL                                  | 41 |
| CAPITULO VI. ANTECEDENTES  | 44 |
| Antecedentes nacionales sobre quimioestratigrafía                  | 47 |

|  |     |
|--|-----|
| Antecedentes internacionales sobre quimioestratigrafía | 50  |
| CAPITULO VII. METODOLOGÍA                              | 54  |
| Etapa de campo   | 54  |
| Etapa de laboratorio                                   | 55  |
| Etapa de interpretación                                | 63  |
| CAPITULO VIII. DISCUSION DE RESULTADOS                 | 64  |
| CAPITULO IX. CONCLUSIONES                              | 116 |
| CAPITULO X. RECOMENDACIONES                            | 118 |
| CAPITULO XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.               | 119 |
| CAPITULO XII. ANEXOS                                   | 129 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Ubicación del área de estudio.  | 5  |
| <b>Figura 2:</b> Gráfico Th/Sc vs. La/Cr para ilustrar diferentes tipos de roca fuente (Tomado de Piovano et al., 1999)  | 10 |
| <b>Figura 3:</b> Factores de enriquecimiento y disminución de los metales redox en sedimento marino. (Tomado de Yarincik et al., 2000a)  | 13 |
| <b>Figura 4:</b> Perfil geoquímico y curva de acumulación porcentual del Mn  | 17 |
| <b>Figura 5:</b> Caja grafica para el Ti. Concentraciones tomadas de las muestras analizadas durante este estudio  | 18 |
| <b>Figura 6:</b> Histograma y polígono de frecuencia. Muestras de la Formación El Paraíso, quebrada Purureche. A. Distribución J invertida. B. Distribución normal                   | 19 |
| <b>Figura 7:</b> Diagrama de dispersión del Ce vs. La. Muestras de la sección de la Formación El Paraíso, quebrada Purureche, estado Falcón  | 21 |
| <b>Figura 8:</b> Dendrograma. Análisis de agrupamiento. Método mínima varianza.  | 23 |
| <b>Figura 9:</b> Localización de las Cuencas Petrolíferas Venezolanas, específicamente ubicación de la Cuenca de Falcón. (Tomado y Modificado de Pérez et al., 1980)                 | 24 |
| <b>Figura 10:</b> Evolución de las Cuencas Pull-apart Falcón y Bonaire. (Tomado y Modificado de Muessing, 1984)  | 26 |
| <b>Figura 11:</b> Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón - Eoceno Tardío. (Modificado de Macellari, 1995)  | 27 |
| <b>Figura 12:</b> Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón. Oligoceno - Mioceno. (Modificado de Macellari, 1995)   | 29 |
| <b>Figura 13:</b> Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón. Plioceno - Reciente. (Modificado de Macellari, 1995)   | 30 |
| <b>Figura 14:</b> Comparación de los Modelos Tectónicos para la Cuenca de Falcón, propuestos por Boesi y Gooddard (1991) A y Wheller (1963) B. (Modificado de Boesi y Goddard, 1991) | 31 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 15:</b> Modelo Tectónico Conceptual para la Cuenca de Falcón propuesto por Boesi y Goddard (1991) (Tomado de Boesi y Goddard, 1991)  | 32 |
| <b>Figura 16:</b> Formaciones asociadas al período Eoceno – Oligoceno – Mioceno Inferior en la cuenca central de Falcón (Tabla de correlación tomada del Léxico Estratigráfico por Díaz de Gomero, 1997) | 35 |
| <b>Figura 17:</b> Espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (EEO-IAP), modelo ULTIMA 2 marca HORIBA Jobin Yvon.   | 58 |
| <b>Figura 18:</b> Analizador LECO modelo C-144   | 60 |
| <b>Figura 19:</b> Analizador LECO modelo SC-432  | 61 |
| <b>Figura 20:</b> Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso y la lutita promedio mundial reportada por Turekian y Wedepohl (1961)                         | 65 |
| <b>Figura 21:</b> Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso y la lutita promedio australiana Post Arqueano [PAAS] (2002)                                  | 66 |
| <b>Figura 22:</b> Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso y las lutitas de la Formación Pecaya. Méndez (2006)   | 69 |
| <b>Figura 23:</b> Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Ce, Si y Zr con respecto al Al   | 72 |
| <b>Figura 24:</b> Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ce, Cr, La y Sc   | 75 |
| <b>Figura 25:</b> Relación interelemental Ni vs. Cr, para discriminar proveniencia sedimentaria  | 77 |
| <b>Figura 26:</b> Diagrama Cr/V vs. Y/Ni para discriminar proveniencia sedimentaria  | 78 |
| <b>Figura 27:</b> Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ni, Cu, Cr, V y Zn  | 81 |
| <b>Figura 27:</b> Continuación. Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ni, Cu, Cr, V y Zn  | 82 |
| <b>Figura 28:</b> Caja Grafica para la variable Zn   | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 29:</b> Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para la variable Zn. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana | 86  |
| <b>Figura 30:</b> Dendrograma para el análisis de agrupamiento de variables con la matriz de datos depurados y estandarizados                                | 88  |
| <b>Figura 31:</b> Dendrograma para la asociación clástica – arcillosa mediante el análisis de agrupamiento restringido                                       | 94  |
| <b>Figura 32:</b> Dendrograma para la asociación carbonatos mediante el análisis de agrupamiento restringido   | 95  |
| <b>Figura 33:</b> Dendrograma para la asociación clástica – arenosa mediante el análisis de agrupamiento restringido   | 96  |
| <b>Figura 34:</b> Dendrograma para la asociación sulfuros mediante el análisis de agrupamiento restringido   | 97  |
| <b>Figura 35:</b> Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Sc, V, Y y Cu  | 100 |
| <b>Figura 36:</b> Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Ce, Cr, La y Pb  | 101 |
| <b>Figura 37:</b> Curvas de acumulación porcentual para los elementos Sc, V, Y y Cu,   | 102 |
| <b>Figura 38:</b> Curvas de acumulación porcentual para los elementos Ce, Cr, La y Pb  | 103 |
| <b>Figura 39:</b> Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Ca, Mg, Mn y C   | 106 |
| <b>Figura 40:</b> Curvas de acumulación porcentual para los elementos Ca, Mg, Mn y C   | 107 |
| <b>Figura 41:</b> Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Fe, Zn, Ni y S   | 111 |
| <b>Figura 42:</b> Curvas de acumulación porcentual para los elementos Fe, Zn, Ni y S   | 112 |



## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1:</b> Longitud de onda y límite de determinación para cada elemento químico   | 59 |
| <b>Tabla 2:</b> Cuadro resumen de las diferencias químicas entre las lutitas de la Formación El Paraíso comparadas con las lutitas promedio mundial reportadas. | 67 |
| <b>Tabla 3:</b> Relación V/Cr para evaluar condiciones redox  | 83 |
| <b>Tabla 4:</b> Análisis de Factores Componentes Principales  | 91 |
| <b>Tabla 5:</b> Asociaciones geoquímicas establecidas por el método estadístico multivariado análisis de factores componentes principales                       | 92 |

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La quimioestratigrafía se ha convertido en los últimos años en una herramienta potencial para la caracterización de las condiciones ambientales de depositación, permitiendo de esta forma, inferir o interpretar la composición de la posible área fuente de los sedimentos, el tipo de clima que prevaleció al momento de la depositación, así como las condiciones redox y paleosalinidad del ambiente sedimentario analizado. La importancia de la utilidad de esta técnica se ve incrementada en el estudio de secciones sedimentarias con poco o ningún control lateral de facies, así como en secciones sedimentarias estériles.

Debido al levantamiento y discordancia regional del Eoceno y al diacronismo del inicio de la sedimentación del Oligoceno en la cuenca de Falcón, existe poca información que sustente la continuidad de la secuencia estratigráfica del intervalo de tiempo Eoceno – Oligoceno en dicha cuenca. Por tal motivo, se propone determinar las condiciones geoquímicas y geológicas que prevalecieron durante el origen de Falcón como una cuenca individualizada especialmente al inicio de la sedimentación del Oligoceno.

El límite Eoceno – Oligoceno ha sido reportado por Berroterán y Ziritt (2004) y Romero y Salas (2004), indicando que puede observarse la presencia de una discontinuidad que pone en contacto rocas de la Formación Jarillal (Eoceno Medio terminal – Eoceno Tardío temprano) con rocas pertenecientes a la Formación Churuguara – Castillo (Oligoceno Temprano a Medio). Sin embargo, no muestran evidencias suficientes para caracterizar esta zona de contacto.

En el 2006, Ariza llevó a cabo una caracterización quimioestratigráfica del límite Eoceno – Oligoceno en una sección ubicada en la localidad de Baragua, estado Lara, donde afloran las formaciones El Paují, Santa Rita y Jarillal del Eoceno y las formaciones Churuguara – Castillo (sin diferenciar) de edad Oligoceno. Adicionalmente, con el fin de establecer comparaciones, se realizó el levantamiento geológico y muestreo de la Formación El Paraíso (Oligoceno), en la localidad de Purureche, estado Falcón. Este estudio sólo determinó los elementos mayoritarios mediante la técnica de fluorescencia de rayos X.

Dado que no existen muchos estudios quimioestratigráficos detallados de la Formación El Paraíso, región sur-central de la cuenca de Falcón, el presente trabajo pretende determinar las condiciones paleoambientales que prevalecieron durante la formación de dicha cuenca, caracterizando geoquímicamente esa sección tipo del inicio de la sedimentación del Oligoceno.

Por lo tanto, se estimará el comportamiento de varios atributos químicos, específicamente las variaciones estratigráficas de los elementos minoritarios y trazas, a través de la interpretación de diferentes perfiles geoquímicos en la zona de estudio seleccionada, la quebrada Purureche, ubicada en la región sur-central del estado Falcón. Con este estudio se persiguió mejorar el conocimiento que se tiene sobre el origen y evolución de esta cuenca sedimentaria, y establecer las relaciones de las litofacies presentes con las quimiofacies definidas mediante los diferentes indicadores geoquímicos a utilizar.

## **OBJETIVOS**

### ***Objetivo general***

Estudiar las variaciones estratigráficas en los diferentes atributos químicos medidos en la Formación El Paraíso, con la finalidad de realizar interpretaciones en la geoquímica sedimentaria prevaleciente para el momento de la individualización de la cuenca de Falcón durante el inicio de la sedimentación del Oligoceno.

### ***Objetivos específicos***

- Identificar las posibles quimiofacies existentes en la sección, asociadas a cambios en las tendencias de los elementos químicos, específicamente los elementos minoritarios y trazas.
  
- Realizar una integración de la información geoquímica con los datos litológicos disponibles para la sección de estudio, con el objetivo de reforzar las evidencias de la evolución de Falcón como una cuenca individualizada.
  
- Determinar e inferir la composición del área fuente de los sedimentos al momento del inicio de la depositación de la cuenca de Falcón.
  
- Determinar las variaciones en las condiciones óxido - reductoras dentro de la secuencia sedimentaria analizada.

## **CAPITULO II**

### **UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio comprende una sección establecida dentro del estado Falcón. Dicha sección corresponde a la localidad de Purureche ubicada en la región sur-central del estado Falcón en el distrito Democracia. En esta sección la recolección de muestras se realizó en la quebrada Purureche, específicamente en un flanco del anticlinal dispuesto en un área cercana a la coordenada UTM 1.189. 263N, 388.222E.

La localidad de muestreo se encuentra representada en la figura 1, donde puede apreciarse el mapa geográfico y las vías de acceso del estado Falcón.

La quebrada Purureche se encuentra cerca del poblado con el mismo nombre, en un área comprendida entre las coordenadas:

- A. 387.730 E - 1.190.635 N
- B. 387.856 E - 1.190.635 N
- C. 387.730 E - 1.190.465N
- D. 387.856 E - 1.190.465 N

Para acceder al poblado de Purureche es necesario tomar la carretera Falcón – Zulia, agarrar luego el desvío que conduce hacia el poblado de Pedregal, aproximadamente 30 minutos hacia el sur del mismo.



## **CAPITULO III**

### **FUNDAMENTO TEÓRICO**

#### **Geoquímica**

Como su nombre lo indica, la geoquímica estudia todos los procesos químicos que se desarrollan en el sistema terrestre. Su misión consiste en seguir y predecir el comportamiento de los elementos químicos constituyentes de la naturaleza que nos rodea.

En geoquímica, la unidad fundamental de investigación es el elemento químico y su átomo. Los elementos químicos, a modo de unidades naturales independientes, se mueven, combinan o migran a través de la corteza terrestre. El estudio de las leyes que rigen las combinaciones de los elementos y de los minerales, verificadas a diferentes presiones y temperaturas en las diversas zonas de la corteza terrestre, constituye la base fundamental de la geoquímica moderna.

La corteza terrestre está compuesta químicamente por nueve elementos: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio y titanio, en orden relativo de abundancia. Estos elementos constituyen el 99% de la corteza y están agrupados en mayor proporción dentro de los minerales silicatos y aluminosilicatos (Mason y Moore, 1982).

La aplicación de la geoquímica a las rocas sedimentarias, tanto clásticas como no clásticas; involucra analizar todos los cambios químicos generados por los diversos procesos asociados a estos tipos de rocas como la meteorización, transporte, depositación, diagénesis y litificación. Según Pearce (1994), las secuencias sedimentarias pueden caracterizarse y subdividirse tomando en cuenta la concentración absoluta y las relaciones entre los elementos mayoritarios, minoritarios

y trazas; así como la tendencia de los patrones normalizados de los elementos tierras raras. Esta caracterización en base al comportamiento geoquímico de las rocas, ha permitido la creación de una nueva herramienta denominada Quimioestratigrafía.

### **Quimioestratigrafía**

Diversas definiciones pueden explicar de una forma global el significado de una de las técnicas más recientes dentro del mundo de la interpretación geológica, conocida como la quimioestratigrafía. A modo general, es una rama de la estratigrafía y la geoquímica que involucra la correlación y caracterización de los sedimentos y las rocas sedimentarias a través del uso de concentraciones de elementos mayoritarios, minoritarios, trazas, fósiles moleculares y ciertas relaciones isotópicas que pueden ser medidas sobre los componentes de las rocas.

La quimioestratigrafía es una técnica que estudia la geoquímica inorgánica y orgánica de las secuencias sedimentarias. En términos más sencillos, es una técnica que utiliza variaciones en la geoquímica de los sedimentos como una herramienta de correlación (Pearce, 1994). Los isótopos utilizados en la quimioestratigrafía pueden ser divididos dentro de tres clases: radiogénicos (estroncio, neodimio y osmio), radioactivos (uranio, torio, plomo) y estables (oxígeno, carbono y azufre). Las concentraciones de elementos trazas (metales tales como níquel, cobre, molibdeno y vanadio) y ciertas moléculas orgánicas (llamadas marcadores biológicos o biomarcadores) son también utilizados dentro de la quimioestratigrafía (Pearce, 1994).

De acuerdo a Pearce et al. (1999), la quimioestratigrafía involucra la aplicación de la geoquímica de los elementos mayoritarios y trazas para la caracterización y correlación de los estratos dentro de las cuencas sedimentarias, particularmente, en aquellas cuencas donde el control bioestratigráfico es relativamente pobre. La geoquímica de los sedimentos es altamente variable y es sensible a los mínimos cambios en la composición. Por lo tanto, sucesiones sedimentarias aparentemente uniformes pueden mostrar diferencias primarias en la química de sus minerales



constituyentes, o en las proporciones de minerales accesorios (minerales pesados y arcillas), donde mucho de los cuales tienen contenidos de elementos traza muy distintivos.

Los datos químicos necesarios para hacer quimioestratigrafía se obtienen utilizando diversas técnicas analíticas, tales como: espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado, espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado, activación neutrónica, fluorescencia de rayos X, entre otras. Las dos primeras técnicas proporcionan una adquisición rápida de los datos con una calidad muy alta para aproximadamente 30 elementos dentro de un gran número de muestras. La información adquirida a través de estas técnicas permite precisar una “huella geoquímica” característica para las unidades sedimentarias. Estas huellas geoquímicas se concentran en la distribución de los elementos traza y tierras raras, los cuales son comúnmente asociados con los minerales accesorios.

### **Aplicaciones de la quimioestratigrafía**

#### **Análisis de composición de roca fuente (Proveniencia sedimentaria)**

Diversos estudios para determinar las fuentes de las rocas sedimentarias se han llevado a cabo analizando la composición elemental de lutitas, areniscas, suelos y/o sedimentos (Cullers, 2000). La proveniencia de las areniscas ha sido tradicionalmente determinada por técnicas petrográficas clásicas, pero en algunos casos, las areniscas con una fracción importante de granos finos, pueden tener relaciones de elementos traza que pueden proporcionar información adicional de la fuente.

Los tipos de roca fuente, las condiciones fisicoquímicas de los ambientes depositacionales y los procesos diagenéticos tienen control sobre la composición de las rocas sedimentarias clásticas. Los indicadores geoquímicos pueden ser utilizados para identificar proveniencia sedimentaria y la intensidad de los procesos de meteorización. Los mejores indicadores geoquímicos son todos aquellos elementos

que sean menos afectados por los procesos de meteorización, y los mismos representan a la composición de la roca fuente. Tales elementos “inmóviles” incluyen a los patrones de los elementos tierras raras y las relaciones de La o Th sobre Sc, Co o Cr (Piovano et al., 1999).

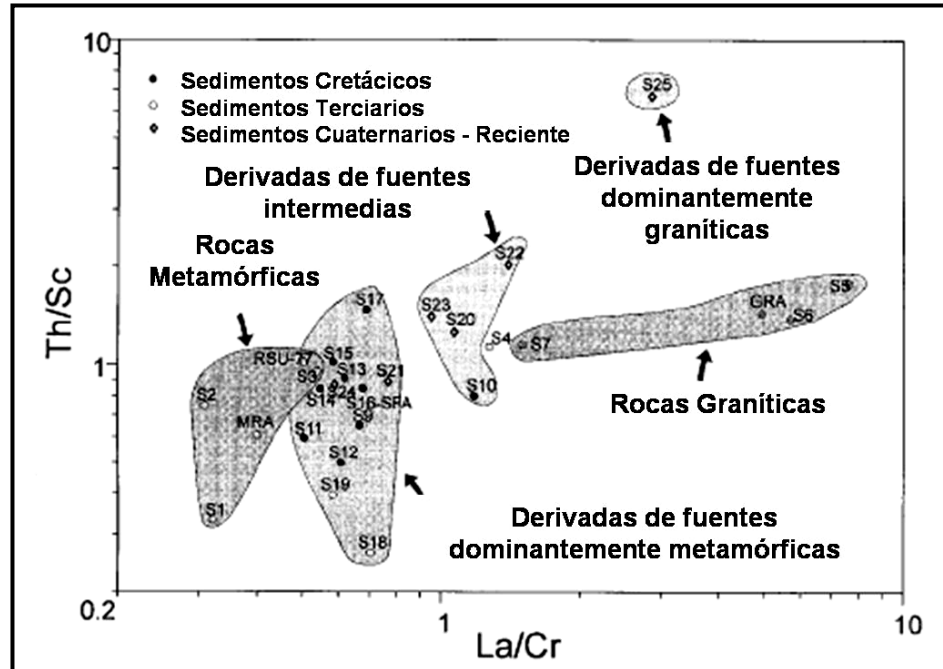
El uso de elementos trazas y relaciones isotópicas en lutitas ha proporcionado la información más genuina de la proveniencia de las rocas sedimentarias. Para este fin se utilizan relaciones interelementales entre especies relativamente inmóviles durante la meteorización y transporte, por lo que mantienen su relación similar a la de la roca previamente al proceso de alteración, como por ejemplo: La/Co, Th/Co, Th/Sc, Th/Cr, etc (Cullers, 2000).

Concentraciones de los elementos La y Th se encuentran mayormente en rocas silíceas félsicas que en rocas ígneas máficas. El Co, Sc y Cr están más concentrados en rocas máficas que en rocas ígneas félsicas. Estos elementos son relativamente inmóviles durante los procesos de meteorización. Por lo tanto, las relaciones de La o Th con Co, Sc ó Cr son indicadores sensibles de la composición de la roca fuente (Cullers, 2000).

Las rocas graníticas muestran concentraciones de los elementos tierras raras mucho más bajas que las rocas metamórficas. Por consiguiente, los diagramas multi-elementales y los normalizados de tierras raras revelan patrones que pueden ser utilizados para determinar la composición probable de la roca fuente (Piovano et al., 1999).

Las relaciones Cr/Th, La/Cr, Th/Sc y Sm/Nd sirven como una herramienta diagnóstica para identificar la proveniencia de los sedimentos. Por ejemplo, valores bajos de La/Cr y Th/Sc conjunto con altos valores en la relación Cr/Th, representan excelentes indicativos de fuente metamórfica. Procesos de transporte muy largo sobre terrenos metamórficos producen las mayores concentraciones de los elementos tierras

raras. La fuente de los sedimentos puede ser discriminada a través de gráficos contruidos con las relaciones interelementales Th/Sc vs. La/Cr (figura 2).



**Figura 2:** Gráfico Th/Sc vs. La/Cr para ilustrar diferentes tipos de roca fuente (Tomado de Piovano et al., 1999)

Los elementos Ce, Nd, Eu y Tb suelen estar enriquecidos en las fracciones de tamaño de grano limo – arcilla. La baja concentración de los elementos trazas en la fracción arena es atribuido a la dilución por la presencia de cuarzo. Sin embargo, a pesar de que las relaciones elementales son afectadas por la distribución del tamaño de grano de los sedimentos, la información que suministra las diferentes concentraciones de los elementos químicos, permite que los mismos puedan ser utilizados como indicadores geoquímicos.

Por otro lado, los estudios realizados por Piovano et al. (1999) demostraron que las anomalías de Eu pueden emplearse como una herramienta de correlación estratigráfica para diferenciar rocas terciarias de los sedimentos remanentes. De igual forma, establecieron que estas anomalías de Eu no pueden ser ligadas a parámetros texturales, representando el Eu otro elemento para discriminar proveniencia

sedimentaria. Debido a esto, las rocas ígneas félsicas contienen anomalías negativas de Eu, mientras que las rocas ígneas máficas contienen poco o nada de las anomalías de Eu (Cullers, 2000).

Otra forma muy útil en la determinación de la proveniencia sedimentaria, son los gráficos clásicos de geoquímica sedimentaria, tales como los diagrama de Herron (1988) o diagramas ternarios de Sc, Th, Y, La, Ce, o cualquier otro elemento considerado inmóvil (Martínez y Camposano, 2000; Reategui, 2001; citado por Montilla, 2006). Los diagramas de Herron, representan una herramienta de clasificación de areniscas y lutitas con base en la composición química (logaritmo de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  y Ca).

### **Análisis de condiciones redox**

Muchos estudios se han llevado a cabo para establecer modelos que expliquen la preservación de la materia orgánica, así como la acumulación de ciertos elementos químicos sensibles a las modificaciones del potencial de óxido-reducción; basados en el análisis de las condiciones de la oxigenación de la columna de agua en contacto con el sedimento (Rimmer, 2004).

Para determinar las condiciones redox que prevalecieron en el momento de la depositación de los sedimentos, es posible utilizar elementos cuya movilidad dependa del potencial de oxidación del ambiente. Estos elementos poseen diferentes estados de valencia, y generalmente sus formas reducidas existen en condiciones de niveles bajos de oxígeno, en las cuales son rápidamente acomplejados con ácidos orgánicos y pueden precipitar como sulfuros u oxi-hidróxidos insolubles (Montilla, 2006).

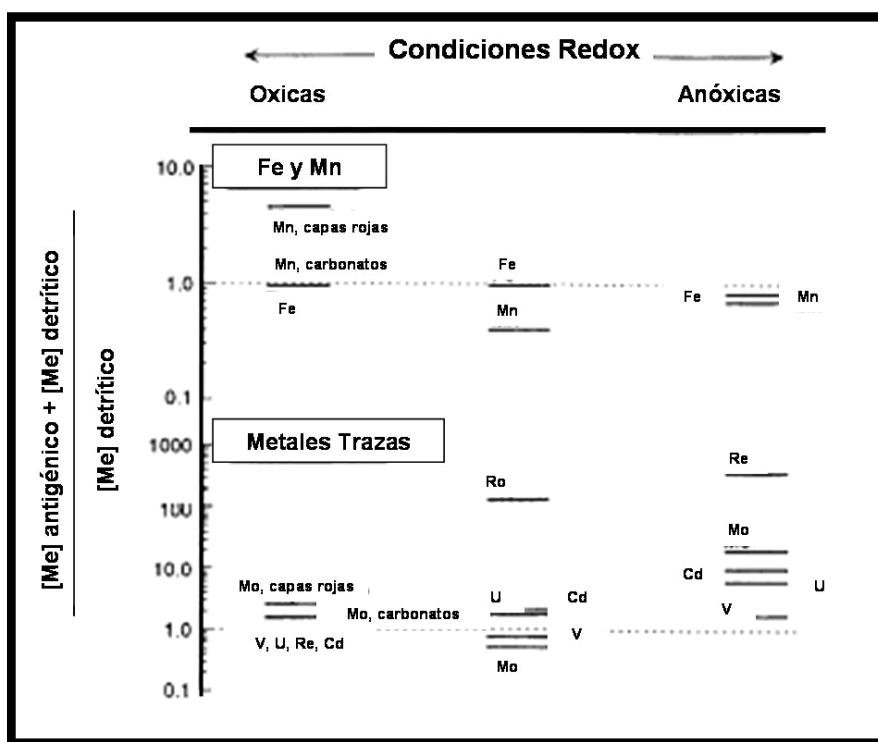
Las concentraciones de los metales óxido-reductores (redox) en los sedimentos marinos son influenciados en principio por variaciones en las condiciones de oxigenación de la columna de agua y la oxigenación del agua de fondo (Yarincik et al., 2000a).

Diversos elementos pueden ser movilizados y reubicados en respuesta a las variantes condiciones redox (As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, S, Sb, Se, Ti, U, V, Zn) mientras que otros elementos parecen no afectarse por estos procesos de óxido-reducción, resultando inmóviles (Si, Ti, Al, Mg, K y Zr) (Jarvis et al., 1998).

Podemos utilizar como ejemplo de un elemento redox a la geoquímica del Mn. El manganeso es altamente insoluble bajo condiciones oxidantes y es incorporado dentro de los sedimentos marinos como oxihidróxidos asociados a la materia orgánica, carbonatos y partículas detríticas (Jarvis et al., 2001). La descomposición bacteriana de la materia orgánica en los sedimentos, consume oxígeno y genera el desarrollo secuencial de condiciones subóxicas y anóxicas. El Mn ocurre a concentraciones elevadas en las zonas de mínimo oxígeno sobre los márgenes continentales y en las aguas de fondo en cuencas anóxicas.

En ambientes reductores, este elemento puede ser incorporado dentro de los carbonatos de Ca y Mn autigénicos. La cantidad de carbonato de Mn formado será controlada por los flujos de carbono orgánico y oxihidróxidos de Mn, así como la tasa de sedimentación. El flujo de carbono orgánico es importante debido a que el Mn es atrapado por partículas orgánicas y este flujo además controla la profundidad de los límites subóxicos – óxicos en el sedimento (Jarvis et al., 2001).

El Mn es más lábil que el Fe y durante condiciones reductoras y anóxicas, el Mn que se encuentra en los sedimentos de fondo puede ser disuelto e incorporado dentro de la columna de agua anóxica suprayacente. La figura 3 muestra los factores de enriquecimiento y disminución de los metales redox en sedimento marino con respecto a la lutita para los tres diferentes regímenes de oxidación (Yarincik et al., 2000a; Morford, J y Emerson, S., 1999).



**Figura 3:** Factores de enriquecimiento y disminución de los metales redox en sedimento marino. (Tomado de Yarincik et al., 2000a).

En la práctica, muchas de las relaciones de los elementos redox se ven complicadas por la formación de fases diagenéticas y singenéticas tales como la pirita (Yarincik et al., 2000). De tal forma, el Fe representa otro indicador sensible de las condiciones de oxigenación mediante el conocido *grado de piritización* (DOP) (Raiswell et al., 1988; citado por Rimmer, 2004).

El grado de piritización (DOP) se refiere a la relación del hierro pirítico sobre el hierro reactivo total (hierro pirítico más el hierro soluble en HCl). Raiswell et al. (1988); citado por Rimmer (2004), determinaron que valores de  $DOP \leq 0.42$  ocurren en sedimentos depositados bajo condiciones aeróbicas, mientras que valores de  $DOP \geq 0.75$  indican condiciones anaeróbicas ó inhospitables. Por consiguiente, el valor de DOP igual a 0.42 podría aproximarse al límite entre las condiciones óxicas y disóxicas, mientras que el valor de DOP igual a 0.75 pudiese establecer el límite entre las condiciones disóxicas y anóxicas – euxínicas.

En el estudio geoquímico de los indicadores paleoredox llevado a cabo sobre muestras de lutitas negras de la cuenca central de los Apalaches, Rimmer (2004) utilizó este grado de piritización (DOP), así como empleó el Diagrama de Berner (C vs S) para determinar el tipo de sedimento. Finalmente, este estudio evidencia como ciertas relaciones geoquímicas (Ni/Co, V/(V+Ni) y V/Cr) reflejan las condiciones de oxigenación imperantes.

### **Análisis de paleosalinidad**

Se utilizan elementos que permanezcan en solución durante el proceso de meteorización y transporte; posteriormente estos elementos son incorporados a la roca por precipitación, a partir de las soluciones acuosas atrapadas en los poros de los sedimentos. La distribución de dichos elementos en aguas dulces y saladas debe ser marcadamente distinta, de esta manera se puede registrar la salinidad del ambiente sedimentario, ejemplo de estos elementos son B, S, Sr, Br. La selección de estos elementos utilizados dependen de su potencial iónico (Montilla, 2006).

El boro constituye el 0,001% en la corteza terrestre. Está también presente en el agua de mar en unas cuantas partes por millón (ppm). Existe en pequeñas cantidades en la mayoría de los suelos y es un constituyente esencial de varios silicatos tales como la turmalina y la datolita. En la naturaleza hay sólo un número limitado de localidades con concentraciones altas de boro o grandes depósitos de minerales; los más importantes parecen ser de origen volcánico (Mason y Moore, 1982).

Este elemento también puede ser incorporado dentro de las estructuras de las arcillas, por lo tanto, el trabajo de Walker (1963) emplea al elemento B como un índice geoquímico de paleosalinidad. El autor establece la relación B/K<sub>2</sub>O, considerando únicamente al potasio que es aportado por el mineral illita. Esta relación presenta sus limitaciones, dado que parte del boro no solamente puede asociarse a la illita sino que también puede adherirse a otros minerales de arcilla como la montmorillonita.

### **Análisis de condiciones climáticas prevalecientes**

La relación K/Al es la más comúnmente utilizada para determinar las condiciones climáticas que marcaron el proceso de meteorización de las rocas sedimentarias preexistentes (Martínez, 2001; Reategui, 2001; Yarincik et al., 2000b).

Cuando las condiciones ambientales son propicias para que la meteorización química prevalezca frente a la meteorización física, y la lixiviación sea tal que permita la pérdida de K y Si, se originará un enriquecimiento relativo de Al (Montilla, 2006).

Si encontramos areniscas principalmente arcósicas con cierta cantidad de cuarzo, feldespatos y ocasionalmente minerales de arcillas, sugiere una meteorización química incipiente. Por lo tanto, areniscas con una relación Qz/Feld-K mucho mayor sugieren una meteorización más intensa capaz de remover la mayor cantidad de feldespatos (Cullers, 2000).

Yarincik et al. (2000a) determinaron que las variaciones en el contenido de oxígeno de las aguas de fondo en la cuenca de Cariaco están relacionadas a los ciclos glaciales – interglaciales. Ellos precisaron que los períodos interglaciales se caracterizan por una alta productividad reflejada por un elevado porcentaje de carbono orgánico total (COT). La anoxia generada en este período permite el enriquecimiento del sedimento en Mo y V.

Durante los períodos glaciales, la producción primaria disminuye y las condiciones óxicas son restauradas en la columna de agua, como lo indica los bajos valores del porcentaje de COT. Esta transición permite un enriquecimiento relativo de Mn y Fe. Por este motivo, las relaciones Mn/Al y Fe/Al tienden a ser mucho más elevadas en los períodos glaciales. Como puede observarse, la combinación de los análisis químicos y el tratamiento estadístico de los datos pueden tratar de explicar los efectos locales de los cambios climáticos sobre la sedimentación de cualquier cuenca, en este caso, la cuenca de Cariaco, Venezuela (Yarincik et al., 2000a).



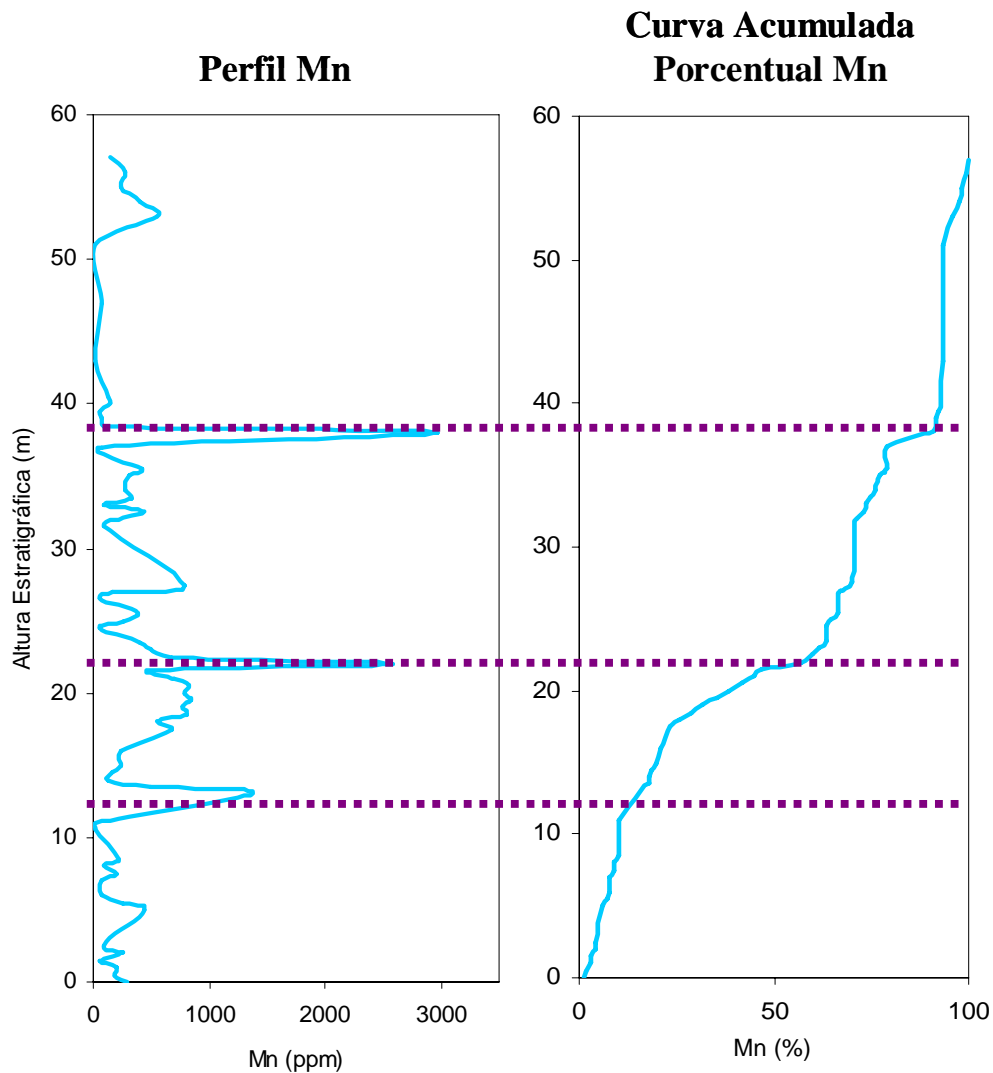
Otro estudio llevado a cabo por Yarincik et al. (2000b), muestra como las relaciones Al/Ti y K/Al en los sedimentos terrígenos presentan variaciones sensibles a los cambios climáticos. La relación K/Al es representativa de la relación illita/caolinita, por lo tanto se tendrán bajos valores de K/Al durante los períodos glaciales, debido a que el bajo nivel del mar genera la restricción de la cuenca incrementándose consecuentemente la proporción relativa de caolinita derivada del drenaje de los ríos locales. Por otra parte, la relación Al/Ti disminuye durante estos períodos glaciales, sugiriendo mayor proporción de partículas de rutilo en suspensión transportadas por agentes eólicos.

### **Perfiles quimioestratigráficos y curvas de acumulación porcentual**

Las concentraciones de los elementos o atributos químicos medidos en las muestras de rocas pueden graficarse en función de la posición que las mismas ocupan dentro de la secuencia estratigráfica. Estas herramientas gráficas son conocidas como perfiles quimioestratigráficos (figura 4).

Estos gráficos son utilizados para identificar los cambios geoquímicos asociados a algún evento geológico, puestos que estos se reflejan como cambios en los patrones de distribución de los elementos químicos a través de la secuencia estratigráfica (Pearce et al, 1999). Las inflexiones mostradas en dichos perfiles generalmente pueden asociarse a los límites que definen quimiofacies.

Por su lado, las curvas de acumulación porcentual representan otra herramienta gráfica que permite corroborar las verdaderas inflexiones mostradas en los perfiles quimioestratigráficos (figura 4). En otras palabras, la interpretación de ambos gráficos en conjunto permite limitar a nivel vertical los cambios dentro de una secuencia, donde los cambios bruscos de pendiente pueden llevar a establecer zonas geoquímicamente similares conocidas como unidades quimioestratigráficas (Pearce et al, 1999).



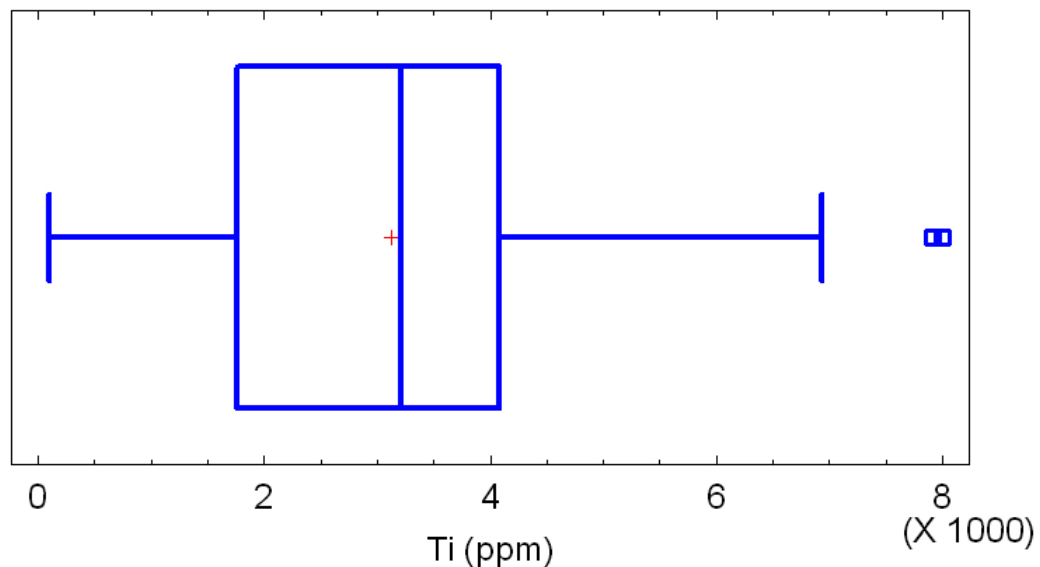
### Estadística descriptiva

La estadística descriptiva estudia la distribución de los datos de una población dando una idea de la tendencia que adoptan los mismos, ya sea hacia valores altos, bajos o intermedios (De Abreu, 2005).

El análisis exploratorio de datos tiene como finalidad identificar y localizar la mediana de las muestras, el grado de dispersión de los datos centrales (cuartiles), los valores anómalos y detectar los diferentes patrones de distribución que pueden tener las concentraciones de los elementos determinados.

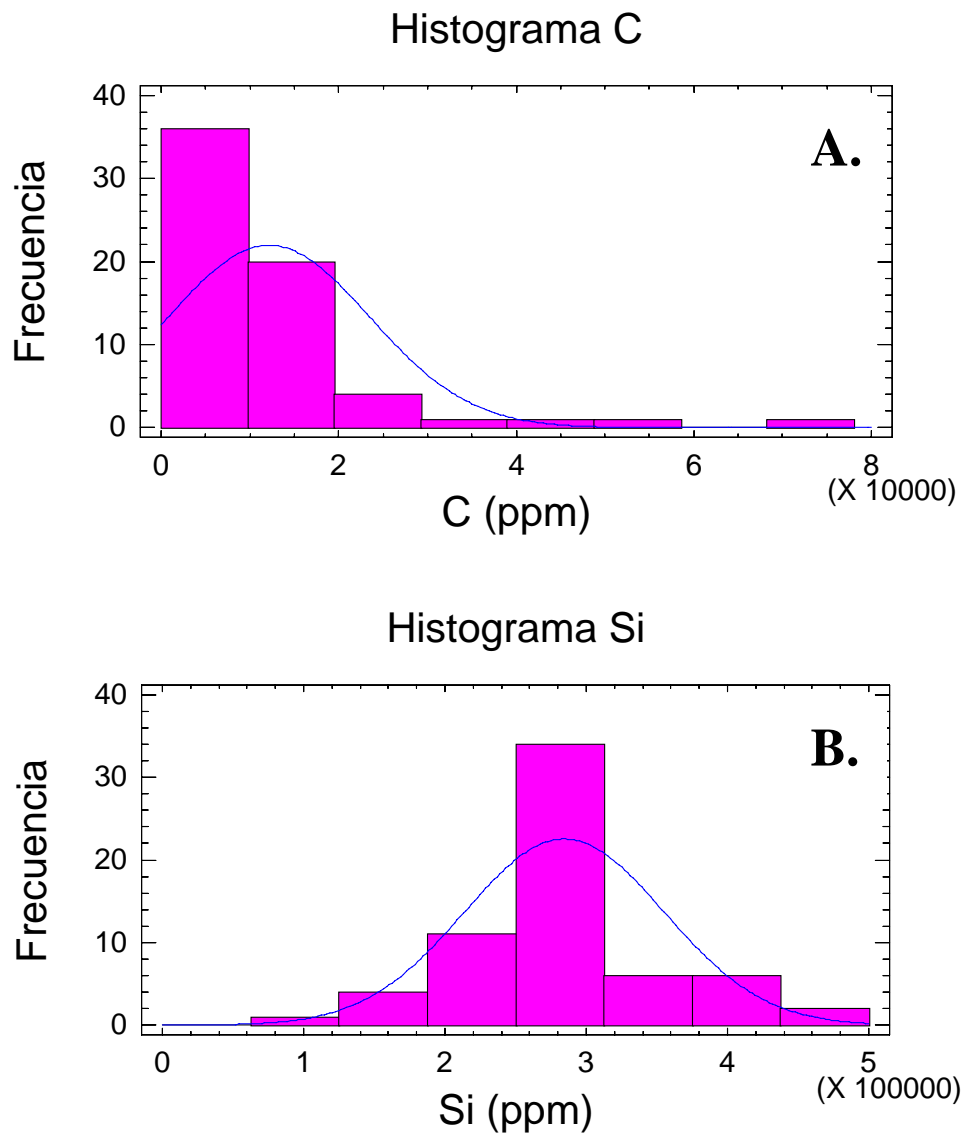
Dentro de los análisis de estadística descriptiva se encuentran las medidas de tendencia central, como la media o promedio y la mediana; las medidas de variabilidad como la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de correlación (Cámel, 2002). Las cajas gráficas, los histogramas de frecuencia y los diagramas de dispersión constituyen herramientas gráficas comúnmente utilizadas para el análisis exploratorio de los datos.

Las cajas gráficas (figura 5), se emplean para conocer como es la dispersión y el comportamiento de los valores con respecto a uno central, de la misma forma, se emplean para determinar valores extremos (anómalos) o para estudiar la distribución del eje de medida (González y Sánchez, 2001). Los valores anómalos, son aquellos que están por debajo o por encima del percentil 25 o 75, respectivamente.



**Figura 5:** Caja grafica para el Ti. Concentraciones tomadas de las muestras analizadas durante este estudio.

Los histogramas de frecuencia son otra herramienta gráfica mediante la cual, la población de datos evaluada queda representada por una serie de barras. La disposición que tomen estas barras suministra información relevante sobre el comportamiento del conjunto de datos. A la par del histograma de frecuencia, 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 6).

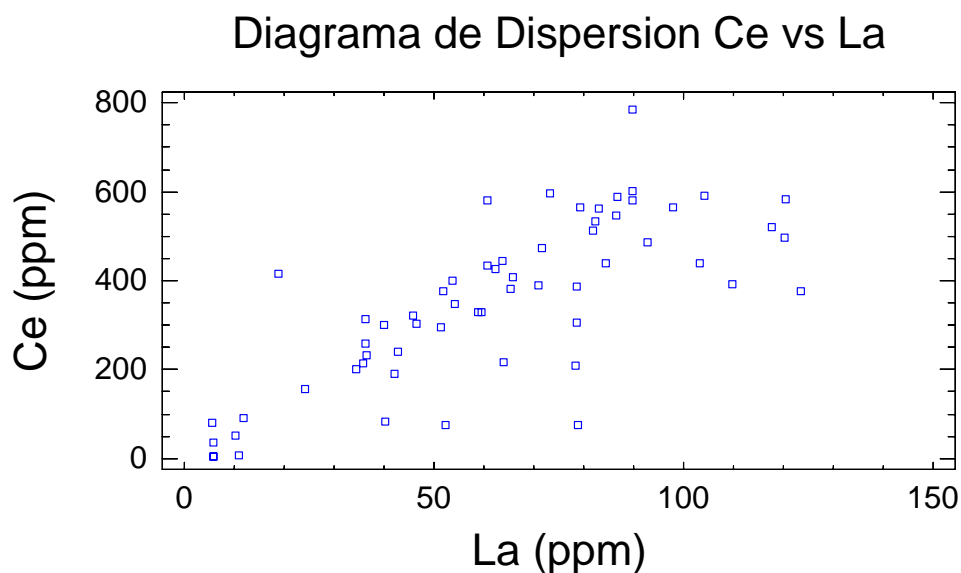


**Figura 6:** Histograma y polígono de frecuencia. Muestras de la Formación El Paraíso, quebrada Purureche. A. Distribución J invertida. B. Distribución normal.

Cuando un histograma de frecuencia muestra una disposición simétrica o de campana, es porque las observaciones que equidistan del máximo central tienen la misma frecuencia (figura 6B). Este patrón se conoce comúnmente como distribución normal. En una distribución en forma de J invertida, el máximo se presenta en un extremo (figura 6A). Este patrón de distribución es muy común dentro de una matriz de datos geoquímicos.

Además de los patrones de distribución nombrados existen otros a saber: distribución moderadamente asimétrica o sesgada, aquí la cola de la curva a un lado del máximo central es mayor que del otro lado. 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, mientras que si ocurre lo contrario se dice que la curva está sesgada a la izquierda o tiene sesgo negativo (Tomado y modificado de Montilla, 2006). Finalmente, los histogramas y los polígonos de frecuencia pueden presentar patrones de distribución con dos máximos (bimodal), o patrones con más de dos máximos (multimodal).

Otra herramienta gráfica muy utilizada para análisis geoquímicos son los diagramas de dispersión (figura 7), los cuales representan un método estadístico empleado para determinar las relaciones existentes entre dos variables. Dichas relaciones, dependen del comportamiento que tenga una variable en función de la otra, de esta forma se tiene que puede ser directa o indirecta, lo cual se determina observando la pendiente de la recta que define la correlación entre las variables. Si la recta tiende a inclinarse, indica que hay relación entre variables, si la pendiente de la misma es negativa la relación es indirecta si es positiva es directa. Por otra parte si la recta tiende a ser horizontal, no existe correlación alguna entre los datos analizados (Camposano, 2002; citado por Ariza, 2006).



**Figura 7:** Diagrama de dispersión del Ce vs. La. Muestras de la sección de la Formación El Paraíso, quebrada Purureche, estado Falcón

### Estadística multivariada

La estadística multivariada es un conjunto de métodos cuya finalidad es analizar una matriz de datos con numerosas variables (multivariantes), para evaluar e interpretar cambios que pueden estar ocurriendo simultáneamente dentro de una población dada.

Su razón de ser radica en un mejor entendimiento del fenómeno objeto de estudio, obteniendo información que los métodos estadísticos univariantes y bivariantes son incapaces de conseguir.

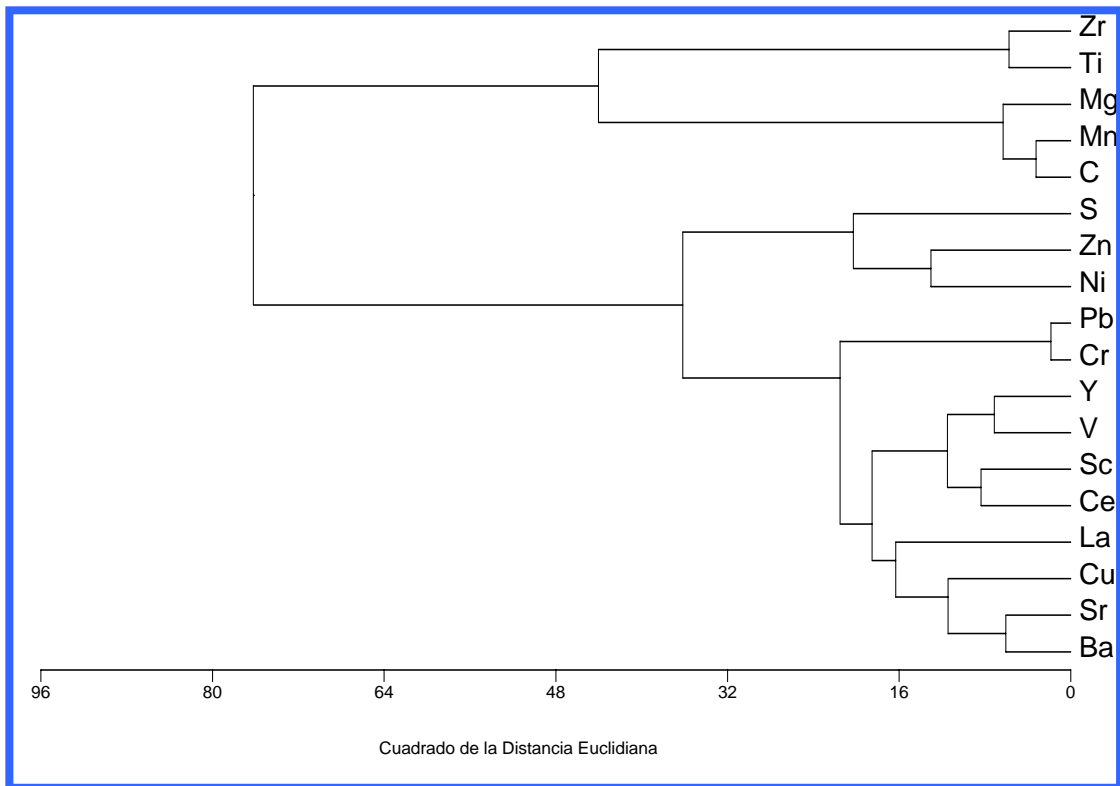
Los métodos de análisis multivariado son divididos en dos categorías: los métodos de análisis de factores y los métodos de clasificación. Las técnicas de análisis de datos más utilizadas en un análisis multivariante son: análisis de componentes principales, análisis de factores, análisis discriminantes, correlación canónica, análisis de varianza, análisis por agrupamiento, análisis por agrupamiento restringido, entre otras. Para interpretaciones geoquímicas se utiliza frecuentemente, el análisis de factores, análisis por agrupamiento y el análisis por agrupamiento restringido.

Los análisis de factores condensan la información y reduce el número de variables originales a un número más manejable sin pérdida de información (De Abreu, 2005). Es una aproximación estadística que puede utilizarse para analizar interrelaciones entre un gran número de variables, para de esta manera integrar la información a un conjunto de factores. Los factores como herramienta estadística aplicada a la geoquímica, pueden ser interpretados como las posibles asociaciones de los elementos químicos en el ambiente natural analizado, tomando su afinidad y comportamiento de los mismos para agruparlos en conjuntos o grupos más pequeños.

Por su parte, el análisis por agrupamiento busca establecer relaciones de cercanía o lejanía de un grupo de datos heterogéneos, de tal forma que se agrupan las variables con base en la posible similitud que hay entre ellas.

El método empleado para graficar el análisis de agrupamiento, es el dendrograma (figura 8), 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 la distancia o disimilitud entre las variables o muestras, dependiendo de lo que se este agrupando, y en el eje vertical se indica la posición agrupada de las variables o casos agrupados.

En otras palabras, el análisis de agrupamiento o “cluster” condensa los datos de acuerdo a su parecido dentro de un grupo, estableciendo la mínima varianza entre ellos, pero a su vez los grupos así formados deben ser lo más heterogéneos posible entre ellos, para clasificar o subdividir la población originalmente evaluada.



**Figura 8:** Dendrograma. Análisis de agrupamiento. Método mínima varianza.

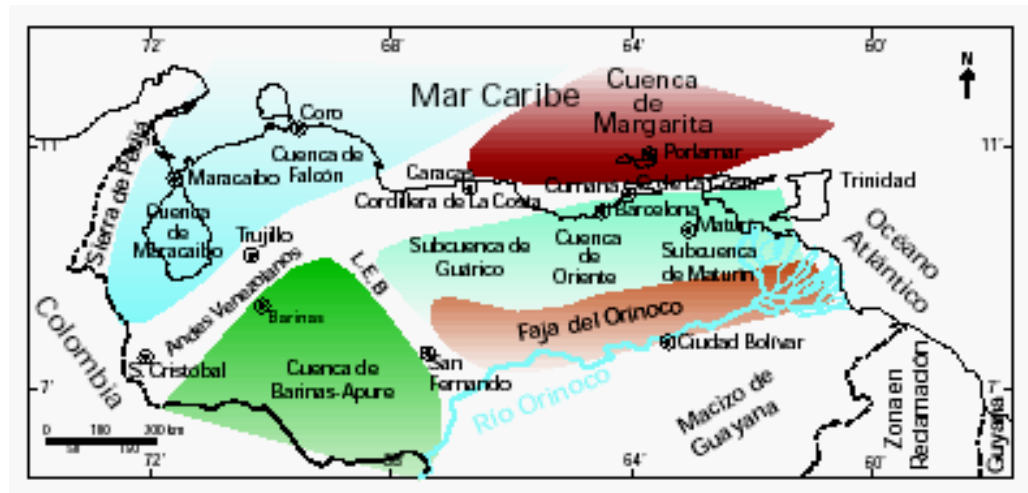
Finalmente, el análisis de agrupamiento restringido o “cluster constrained” es una variación del método anterior (cluster), donde se condiciona la posición de las muestras de acuerdo a la posición exacta que se encuentran dentro de la columna estratigráfica (para el caso de estudios geoquímicos y/o geológicos). Por lo tanto, esta herramienta compara las muestras por encima y por debajo dentro de la sección analizada, permitiendo definir posibles unidades químicas dentro de una secuencia estratigráfica, en base a la agrupación que hace este método entre las muestras evaluadas (Tomado y modificado de Montilla, 2006).



## CAPITULO IV

### MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La cuenca de Falcón abarcaba una gran porción del noroccidente venezolano durante el Oligoceno y Mioceno Temprano. Esta región, cuya extensión actual es de 36.000 Km<sup>2</sup>, se encuentra ubicada en la parte más septentrional de Suramérica (figura 9), fue principalmente una cuenca marina casi completamente rodeada por zonas emergidas, excepto al este y parcialmente al norte, siendo su sedimentación bastante continua en el tiempo, salvo por tres discordancias angulares de algún significado regional. Esta cuenca fue intensamente plegada y tectónicamente invertida por una compresión orientada NO-SE durante el Mioceno Medio y Tardío (Audemard, 1997).



**Figura 9:** Localización de las Cuenas Petrolíferas Venezolanas, específicamente ubicación de la Cuenca de Falcón. (Tomado y Modificado de Pérez et al., 1980)

La parte oriental y central de la cuenca de Falcón se instaló sobre el aloctono caribe sobrecorrido durante la fase de compresión de edad Paleoceno – Eoceno Temprano, como consecuencia de un colapso post-orogénico asociado a la desaceleración de la placa Caribe debido a los niveles de colisión oblicua alcanzados en el margen

meridional de la misma (Audemard, 1997). Por el contrario, su parte más occidental está en contacto con la plataforma carbonática de Maracaibo y el neoaútóctono falconiano es esencialmente de edad Oligoceno-Mioceno.

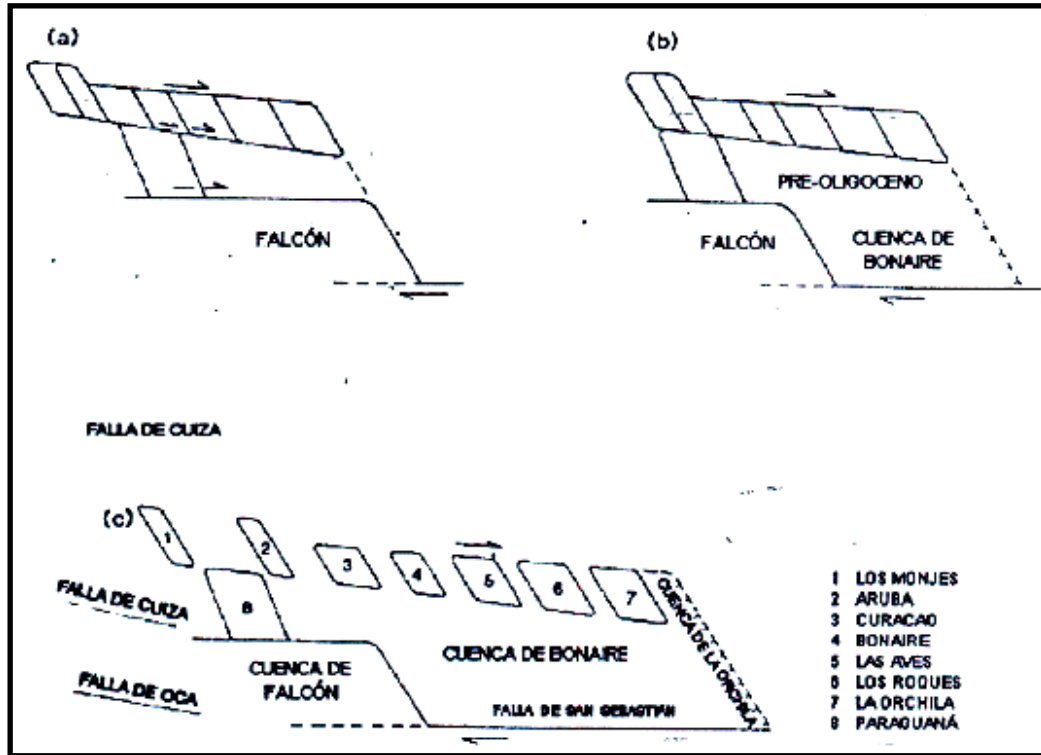
La geodinámica de la región noreste de Venezuela, donde se encuentra ubicada la cuenca de Falcón, resulta bastante compleja debido a que constituye una zona de interacción entre las placas Suramericana y Caribe. Esta complejidad ha permitido el desarrollo de diversas teorías o modelos que intentan explicar el desarrollo y evolución de dicha cuenca:

La teoría tectónica para la cuenca de Falcón planteada por Muessing (1984) comprende el desarrollo de una complicada cuenca tipo *pull-apart* establecida entre dos fallas transcurrentes dextrales con orientación paralela entre sí. Este modelo se respalda en las siguientes evidencias: 1) El fallamiento transcurrente sinsedimentario y las fallas normales con dirección noroeste y este-oeste, 2) La estratificación de un complejo Oligoceno-Mioceno y la rápida subsidencia de la cuenca, 3) Las anomalías de gravedad positiva indicativas de una capa densa de corteza y finalmente, 4) El volcanismo basáltico alcalino y la intrusión ígnea en dirección noroeste.

Dada estas evidencias, Muessing (1984) indica que la cuenca de Falcón se individualizó durante el Eoceno Tardío a Oligoceno, en una zona tipo *pull-apart*, causado por movimientos transcurrentes entre la placa Suramericana y la placa Caribe. Estos movimientos transcurrentes a lo largo de las fallas generaron la extensión en dirección noreste, produciéndose así fallas normales. Estos procesos provocaron el adelgazamiento de la corteza y por consiguiente la generación de magmas basálticos alcalinos.

El modelo estructural propuesto por Muessing (1984) considera que las islas de Los Monjes y La Orchila, la Península de Paraguaná y la cuenca de Falcón estaban casi yuxtapuestas antes de la extensión del Oligoceno. En la figura 10 se representa a

través de tres esquemas ilustrados, el desarrollo de la cuenca de Falcón y el Bloque de Bonaire desde el Eoceno al presente.



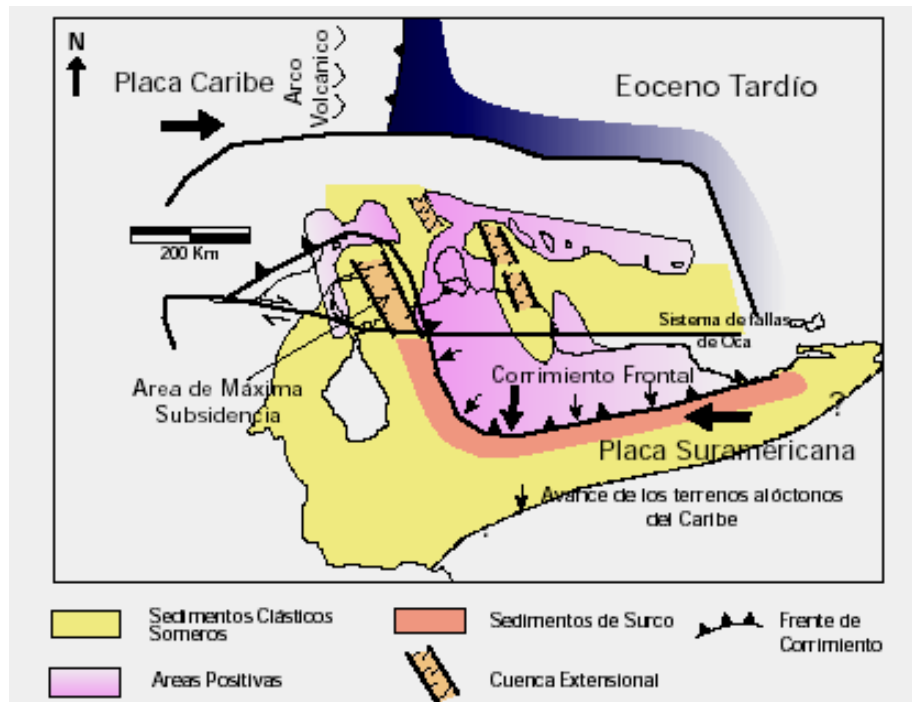
**Figura 10:** Evolución de las Cuencas Pull-apart Falcón y Bonaire. (Tomado y Modificado de Muessing, 1984)

En la gráfica puede apreciarse que las Antillas Menores formaron una unidad contigua conectada a la Península de Paraguaná y a la zona de Falcón, durante el Eoceno Temprano. Luego en el Eoceno Tardío – Oligoceno se generó la cuenca por extensión, evidenciado por el fallamiento y la inyección de magma. Para llevar ambas configuraciones al presente es necesario aplicar una cantidad de extensión y desplazamiento transcurrente dextral del Oligoceno al Mioceno.

En resumen el sistema *pull-apart* de Falcón, es una extensión dispuesta sobre una ancha zona, generando áreas de estabilidad relativa y subsidencia. Paraguaná, Dabajuro, La Guajira y el sur de Siquisique siguieron como altos topográficos,

suministrandosedimentosal graben de las zonas *pull-apart*, mientras que la cuenca de Falcón, el surco de Urumaco, la bahía de La Vela y la cuenca de Bonaire representan las mejores zonas de subsidencia.

Macellari (1995) interpreta la estratigrafía depositada durante el Eoceno hasta el reciente en una serie de cuencas *pull-apart episuturales*. La evolución paulatina del frente de deformación asociado a la entrada de la Placa Caribe frente a Sudamérica, le permitió al autor establecer el siguiente desarrollo tectónico generado por la interacción de dichas placas. La figura 11 muestra en la primera etapa durante el Eoceno Tardío, un desplazamiento entre las dos placas (Caribe y Suramérica), resultando la formación de una extensa zona *pull-apart* en el margen norte de Suramérica, entre el ridge de Curazao y el sistema de fallas San Sebastián – Oca.



**Figura 11:** Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón - Eoceno Tardío. (Modificado de Macellari, 1995)

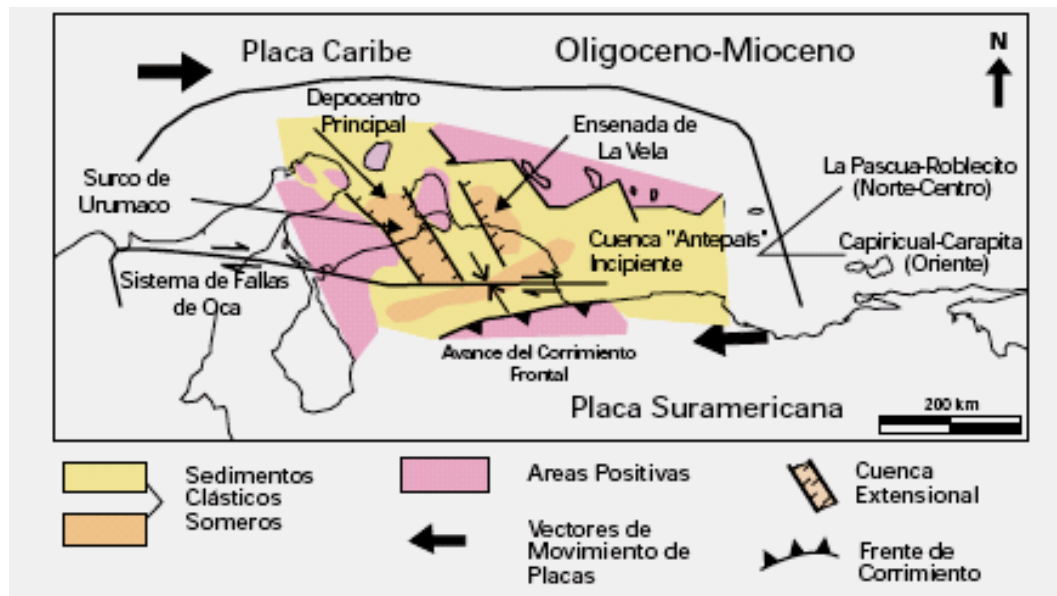
Para ese tiempo (Eoceno Tardío) se iniciaba la sedimentación al norte de los frentes de corrimiento en el estado Falcón con las formaciones La Victoria - Santa Rita y

Jarillal, como consecuencia de la subsidencia de una cuenca extensional asociada a fallamiento de rumbo (tipo “pull-apart”). En otras palabras, la figura 11 permite visualizar la generación de cuencas extensionales asociadas a transcurrencia al sur del límite entre las placas Caribe y Suramericana. Las áreas de máxima subsidencia se ubicaron al norte del estado Falcón en ese tiempo.

La cuenca de Falcón alcanzó su máximo desarrollo y profundización durante el Oligoceno. La sedimentación en la región de Falcón constituyó la respuesta a un marco tectónico diferente al de la sedimentación en las cuencas del Lago de Maracaibo, Barinas-Apure y la Cuenca Oriental. En la figura 12, se muestra cómo se empezaron a generar cuencas extensionales asociadas a transcurrencia, especialmente al norte del estado Falcón; evolucionando paulatinamente a medida que la placa del Caribe avanzaba hacia el este durante el Oligoceno (Macellari, 1995).

Se observa que durante el Oligoceno y Mioceno comenzó un estrechamiento de la cuenca *pull-apart* debido al empuje del material alóctono, por lo que los ejes de máxima subsidencia migraron hacia el oeste entre Urumaco y la bahía de La Vela. El desplazamiento continuó a través del sistema de fallas de Oca-Ancón y se formó un frente de empuje que avanzó progresivamente al norte originándose una cuenca foreland incipiente orientada ENE-OSO.

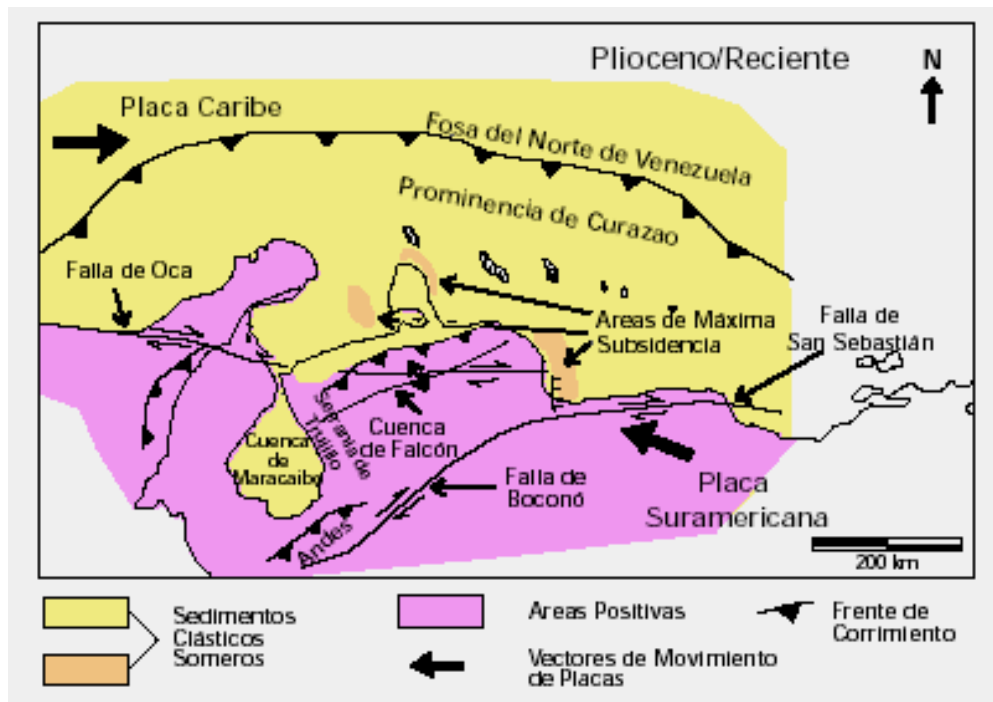
Por lo tanto, la figura 12 permite apreciar el máximo desarrollo del "pull-apart" del estado Falcón y la generación de extensas áreas positivas en la cuenca de Maracaibo y norte de Falcón. Hacia el sur y este, evolucionó la cuenca antepaís, desarrollando "surcos" como los de las formaciones La Pascua - Roblecito (Eoceno Tardío - Oligoceno) y Carapita - Caripicual (Mioceno Temprano - Medio).



**Figura 12:** Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón. Oligoceno - Mioceno. (Modificado de Macellari, 1995)

El Neógeno en Venezuela está signado por importantes períodos de formación de montañas, los cuales son una consecuencia directa de la interacción de las placas del Caribe y Suramérica. En el Plioceno (figura 13), la orogénesis en todo el norte de Venezuela terminó de definir las cuencas petrolíferas actuales y levantó extensas zonas constituyendo el Sistema de Montañas del Caribe y el ramal de los Andes Venezolanos, el cual separa a las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure.

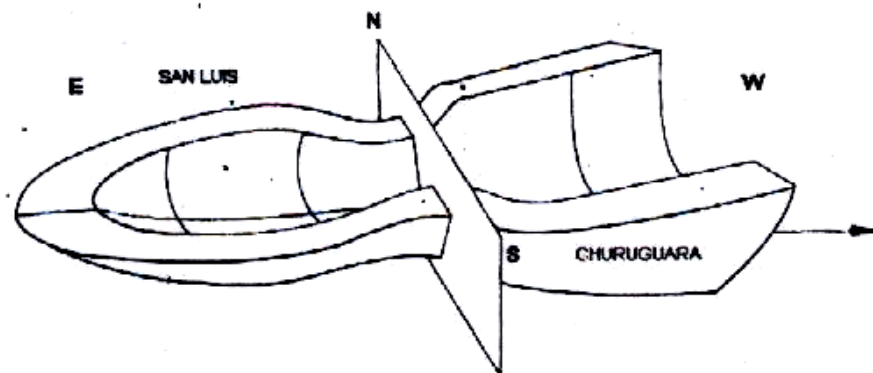
De acuerdo a Macellari (1995), en la figura 13 puede distinguirse la colmatación de las cuencas antepaís y el levantamiento regional del norte de Venezuela, resultado de la deformación de extensas zonas asociadas al sistema de fallas de Boconó, San Sebastián y Oca. De igual forma, las cuencas extensionales siguen manteniéndose al norte del estado Falcón. Por lo tanto, durante el Plioceno, el frente de falla del anticlinorio de Falcón migró más hacia el norte, los desplazamientos destrales activos a lo largo de la falla de Boconó comenzaron durante este período; y finalmente este desplazamiento aunado al movimiento continuo del sistema de fallas de Oca, generan la formación de un depocentro *pull-apart* al sureste de la cuenca de Falcón con espesores de sedimentación de edad Plioceno.



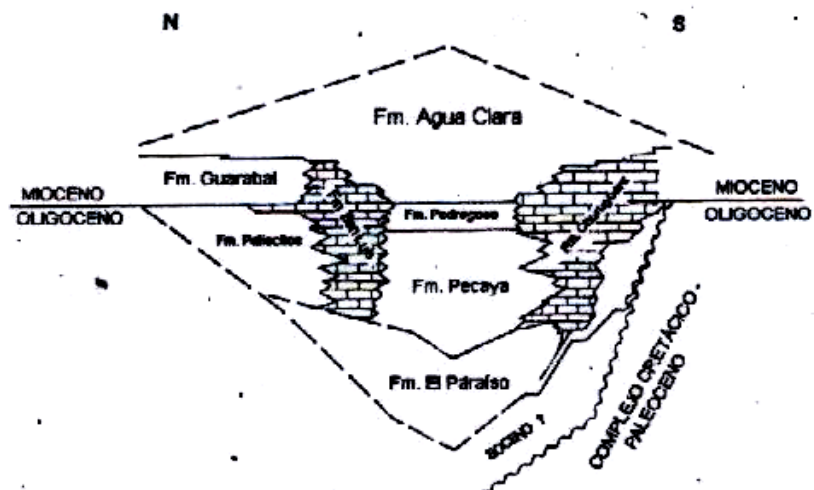
**Figura 13:** Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón. Plioceno - Reciente. (Modificado de Macellari, 1995)

Como ya se mencionó anteriormente, existen diversas teorías sobre la evolución tectónica de la cuenca de Falcón, lo que invita a seguir realizando una recopilación de las propuestas más relevantes:

Wheller (1963) definió una sección estratigráfica transversal a través del centro de la cuenca entre las localidades de San Luis y Churuguara. González de Juana, et al. (1980) realizaron el primer modelo original conceptual de la cuenca de Falcón. Boesi y Gooddard (1991) visualizaron a la cuenca como un depocentro cuya geometría describía la forma de un bote, con un eje de máxima profundidad en sentido este-oeste y una sección angosta localizada entre los pueblos de Churuguara y San Luis. Esta forma controlaba la sedimentación de la cuenca durante el Oligoceno-Mioceno (figura 14).



A. MODELO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DE FALCÓN

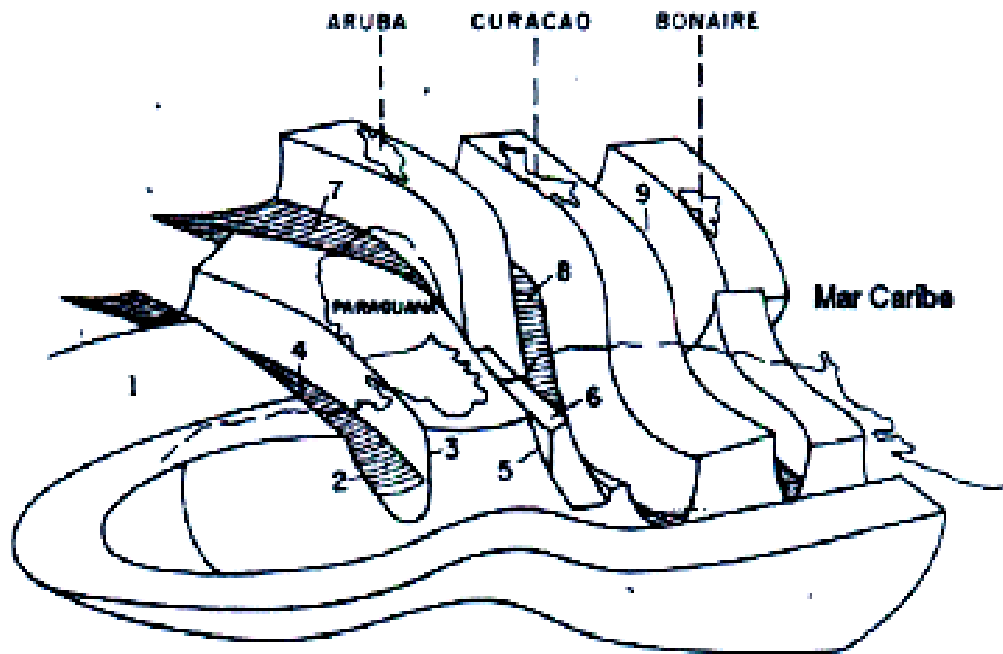


B. SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA TRANSVERSAL A TRAVÉS DEL CENTRO DE LA CUENCA SAN LUIS - CHURUGUARA

**Figura 14:** Comparación de los Modelos Tectónicos para la Cuenca de Falcón, propuestos por Boesi y Gooddard (1991) A y Wheller (1963) B. (Modificado de Boesi y Gooddard, 1991)

Así mismo, Boesi y Gooddard (1991) integraron los dos primeros modelos conceptuales anteriores para proponer un nuevo modelo basado en la información obtenida a través de líneas sísmicas y pozos (figura 15). Este modelo considera una serie de bloques deprimidos y “horst” en sentido noroeste, que se formaron en respuesta a la tectónica extensiva al norte, afectando la distribución y desarrollo de la cuenca sedimentaria central.





- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| 1. PLATAFORMA DE DABAJURO | 6. HORTS DE LA VELA |
| 2. FALLA DEL LAGARTO      | 7. SURCO DE ARUBA   |
| 3. FALLA DE SABANETA      | 8. SURCO DE CURACAO |
| 4. SURCO DE URUMACO       |                     |

**Figura 15:** Modelo Tectónico Conceptual para la Cuenca de Falcón propuesto por Boesi y Goddard (1991) (Tomado de Boesi y Goddard, 1991)

El relleno de la cuenca que proponen los autores es el siguiente: 1) *Eoceno Tardío*: La sedimentación continuó sin interrupción y comenzó la formación de la cuenca de Falcón. Movimientos orogénicos en el sur de la placa Caribe, generaron las islas de Aruba, Bonaire y Curacao, presentes hoy en día como remanentes. 2) *Oligoceno*: La subsidencia se incrementó, tomando la cuenca una forma de bote elongado con un costado inclinado. Se desarrollaron surcos sinsedimentarios y las fuerzas del sur levantaron la región entera en la parte norte, creando el alto de Paraguaná. 3) *Mioceno*: Los esfuerzos complejos aumentaron causando importantes modificaciones paleogeográficas. La inversión de la cuenca comenzó para el Mioceno Medio, generando levantamiento y erosión de los sedimentos que fueron depositados en los canales. La posición ocupada por el eje de la cuenca en el Oligoceno-Mioceno

Temprano ahora se convierte en el eje de la fila conocida como el anticlinorio de Falcón. 4) *Plioceno*: El área de Falcón fue afectada por una actividad tectónica tardía, la cual ocasionó el levantamiento del sistema montañoso. Un período orogénico se hizo presente durante este tiempo.

Audemard (1995) explica la evolución tectónica de la cuenca de Falcón en las siguientes fases:

Fase I: El “rifting” de edad Oligoceno, que es donde nace la cuenca de Falcón, y es una consecuencia de un campo de esfuerzo regional distensivo, cuyo esfuerzo mínimo está orientado N15O. La subsidencia tectónica de la cuenca culmina en el límite Oligoceno-Mioceno con las últimas intrusiones y coladas basálticas, y la colmatación sedimentaria. La subsidencia térmica está representada por los depósitos lutíticos neríticos de la Formación Agua Clara.

Fase II: El cierre de la cuenca de Falcón se inició en el límite entre el Mioceno Temprano y el Mioceno Medio, distinguiéndose tres etapas de diferentes edades: 1) *Mioceno Medio – Tardío*: La cuenca sufrió un proceso de inversión tectónica originado por un campo de esfuerzos mínimo y máximo subhorizontales, este es el régimen que permite estructurar la cuenca de Falcón en un gran anticlinorio, además del plegamiento general de la cuenca. Esta inversión induce al desplazamiento de los procesos sedimentarios hacia el flanco norte del anticlinorio. 2) *Mioceno – Plioceno*: Se produjo una fase tectónica en la plataforma de Coro, lo cual indica que la zona fue sometida a una continua fase de compresión. 3) *Plioceno – Pleistoceno*: Es la fase responsable de la configuración actual de la cuenca y continua activa hoy en día. Constituye la última de una trilogía de fases compresivas caracterizadas por esfuerzos máximos ubicados en el cuadrante NO.

Finalmente, De Toni et al. (2001) reinterpretaron la región de la cuenca de Falcón como un cinturón plegado asimétrico vergente hacia el norte durante el Neógeno.

Este trabajo reúne varias evidencias las cuales modifican la visión actual de Falcón como una zona fundamentalmente relacionada a tectónica transcurrente. Entre esas evidencias podemos mencionar: 1) El frente de deformación actualmente activo a lo largo del flanco noreste de la cuenca, donde los sistemas de anticlinales están acomodados dentro de una zona triangular regional, 2) La deformación compresiva iniciada durante el Mioceno temprano con el progresivo emplazamiento hacia el norte de la zona triangular, la cual esta estratigráficamente controlada por un paquete de lutitas gruesas de edad Oligoceno-Mioceno y 3) El relieve de la megasutura en el tope de la secuencia Oligoceno es de al menos 8 Km, de los cuales 5 Km están por debajo del nivel del mar; entre otras evidencias.

### **Estratigrafía regional**

Para entender la evolución de la región sur – central de la cuenca de Falcón es necesario integrar la información correspondiente a todas las formaciones asociadas al límite Eoceno – Oligoceno. De tal forma, se hace una recopilación de todas las formaciones asociadas a este límite hasta el Mioceno Temprano aproximadamente, período donde termina la subsidencia de la cuenca de Falcón. La figura 16 muestra las formaciones asociadas a este límite de estudio en la cuenca central de Falcón: Jarillal, El Paraíso, Pecaya, Pedregoso, Castillo, Churuguara, San Luis y Patiecitos.

La primera secuencia desarrollada corresponde a la *Formación El Paraíso*. Esta formación es la unidad basal de la transgresión oligocena y su localidad tipo esta en la quebrada El Paraíso, afluente del río Mitare, distrito Bolívar del estado Falcón. En ella predomina las lutitas fisiles grises, lutitas carbonosas, capas delgadas de carbón y areniscas cuarzosas. Su edad ha sido establecida entre el Oligoceno Temprano a Medio.

Díaz de Gamero (1977) habla de un espesor máximo para la unidad de 1000 m, aunque González de Juana et al (1980) mencionan que en la localidad tipo afloran 480 m de la parte superior, aumentando el espesor hacia el norte y el oeste, mientras

que hacia el sur disminuye su espesor. Sin embargo, a pesar de que la base de la formación no está expuesta, son estimados más de 1000 m en la parte central de Falcón.

La *Formación El Paraíso* es muy pobre en microfauna siendo distinta la encontrada en la parte inferior con la localizada en la parte superior de la misma. La extensión geográfica de la *Formación El Paraíso* abarca una larga faja anticlinal, desde el río Mojino en el oeste, hasta los ríos Remedios y Hueque al este. En el extremo occidental desaparece bajo las lutitas de la Formación Pecaya, suprayacente, mientras que al este, se adelgaza hasta su práctica terminación antes de ser cubierta por los aluviones del río Hueque y sus afluentes (Díaz de Gamero, 1977).

Hacia el sur, la parte inferior de la Formación El Paraíso se correlaciona con la parte inferior de la Formación Churuguara (Wheeler, 1963; Díaz de Gamero, 1977). Las relaciones hacia el oeste y norte se desconocen. Al este, se correlaciona con la parte inferior del Grupo Agua Salada, redefinido por Díaz de Gamero (1985).

El contacto basal de la Formación El Paraíso es discordante con la Formación Jarillal, aunque en la región de Taparoy está en contacto aparentemente concordante sobre las lutitas consideradas de la Formación Jarillal; la edad Eoceno Medio asignada a la parte inferior de Jarillal y la edad Oligoceno Medio atribuida a la parte superior de El Paraíso pueden sugerir la existencia de un hiato entre ambas unidades (González de Juana et al, 1980). La sección tipo de la Formación Jarillal, se definió en el intervalo de lutitas que afloran a lo largo de la vieja carretera Piedra Grande – Baragua, cerca del caserío Jarillal, 10 Km. al noreste de Baragua. Esta formación está representada por una secuencia lutítica más o menos arenosa, de color gris oscuro donde los primeros 50 m son muy fosilíferos, con moluscos y crustáceos. La parte superior de la Formación Jarillal en la localidad tipo está constituida por lutitas estériles.

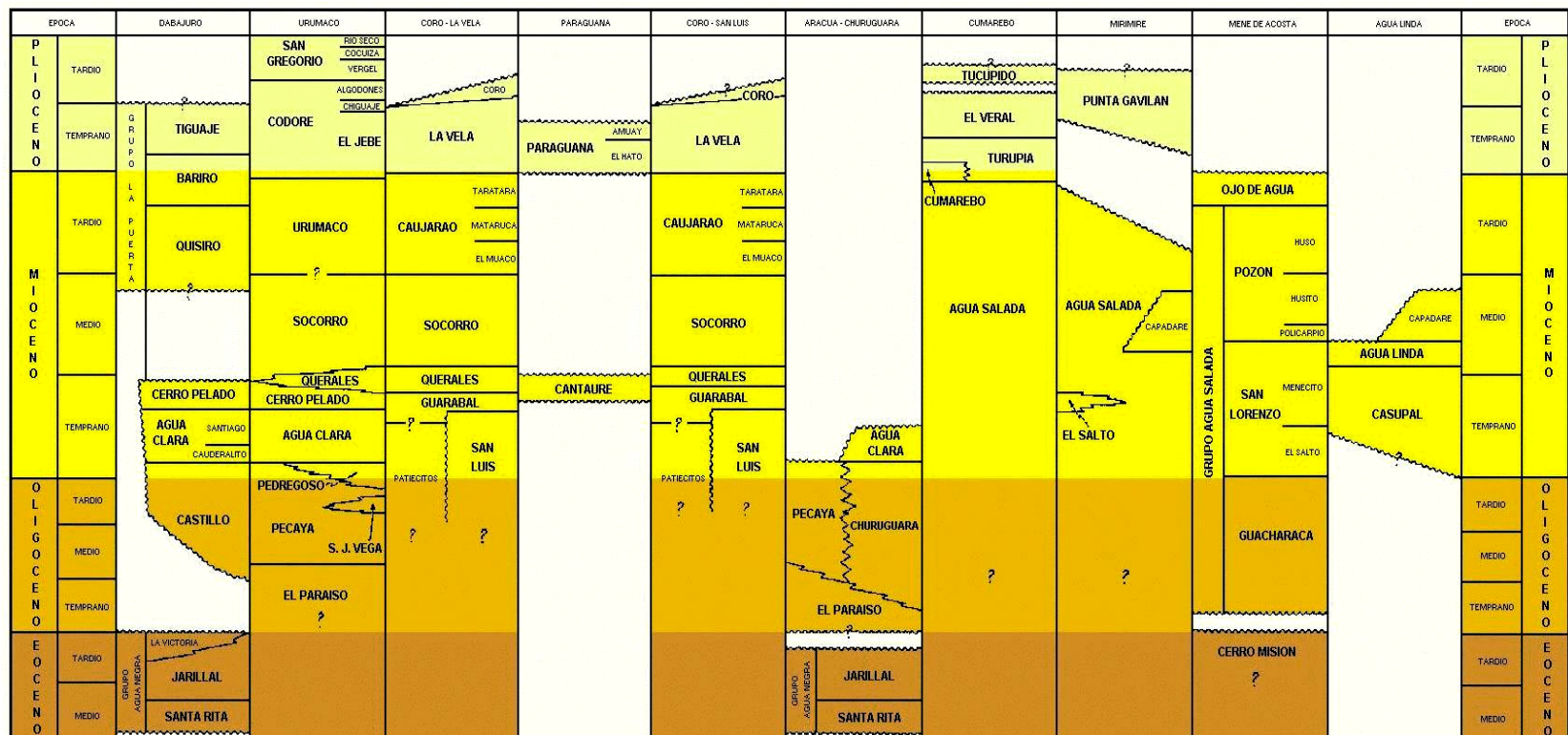


Figura 16: Formaciones asociadas al período Eoceno – Oligoceno – Mioceno Inferior en la cuenca central de Falcón (Tabla de correlación tomada del Léxico Estratigráfico por Díaz de Gomero, 1997)

De forma concordante y suprayacente a la *Formación El Paraíso*, está un extenso cuerpo de lutitas oscuras, conocido como la *Formación Pecaya*, aún más extensa que la anterior, de edad Oligoceno Medio a Mioceno Temprano. La localidad tipo de esta formación se encuentra a unos 10 Km. al oeste de la población de Pecaya, en el río Mitare, distrito Bolívar, estado Falcón. Según estudios más modernos (Díaz de Gamero, 1977), la sección aquí expuesta corresponde tan solo a la parte superior de la formación.

La *Formación Pecaya* consiste esencialmente de lutitas gris oscuro, generalmente fisiles y limolíticas, localmente calcáreas, con ocasionales interstratificaciones de areniscas y calizas bioclásticas, en capas delgadas. La abundante microfauna marina (foraminíferos bentónicos) en Pecaya son indicativos de ambiente marino profundo, en contraste con la escasa microfauna de El Paraíso. Geográficamente, la *Formación Pecaya* ocupa todo el centro de la cuenca de Falcón, entre las serranías de San Luís, al norte y Churuguara, al sur. Hacia el oeste llega a la cuenca del río Tupure y al este hasta la llanura aluvial de los ríos Remedios y Hueque (Díaz de Gamero, 1977).

Suprayacente a la *Formación Pecaya* se tiene a la *Formación Pedregoso* de edad Mioceno Temprano, formada por intercalaciones rítmicas de lutitas oscuras con calizas y areniscas en capas delgadas (González de Juana et al., 1980). La localidad tipo se encuentra a orillas del río Mitare, en la desembocadura de la quebrada La Horqueta. La extensión geográfica de la *Formación Pedregoso* es muy limitada. Se encuentra bordeando el margen suroccidental de la serranía de San Luís, desde Pecaya hasta Agua Clara. Se ha reconocido tan sólo hasta Pedregal al occidente y hasta Guasiquí, unos 8 km al sur de Pecaya (Díaz de Gamero, 1977).

En el flanco sur de la cuenca de Falcón aflora la *Formación Churuguara*, compuesta esencialmente por una serie variable de intercalaciones de calizas limosas que gradan a areniscas calcáreas, calizas arrecifales masivas, calizas arcillosas fosilíferas delgadas, areniscas de varios tipos, areniscas glauconíticas, limolitas micáceas

moderadamente consolidadas y lutitas limolíticas. La edad asignada es Oligoceno Temprano a Mioceno Temprano. Su localidad tipo está definida en la quebrada Mamoncito, en el flanco sur del anticlinal de Buena Vista (Wheeler, 1963). Otra sección importante, según este mismo autor, es la que aflora en la carretera vieja Falcón-Lara, entre el cerro Los Indios y el cerro Bereboro. Wheeler (1960) indica un espesor de 1.215 m en la quebrada Mamoncito, mencionando que la unidad se hace más delgada hacia el sur y más gruesa hacia el norte y oeste.

La *Formación Churuguara* aflora extensamente en el flanco sur de la cuenca de Falcón y se reconoce hacia el oeste hasta la quebrada Mamoncito y, hacia el este, hasta más allá de Churuguara (Wheeler, 1960). De acuerdo a Wheeler (1963), el contacto de la *Formación Churuguara* con la *Formación Jarillal* infrayacente, es concordante, al igual que su contacto con la *Formación Agua Clara*, suprayacente. Según Díaz de Gamero (1977), el contacto inferior es concordante al norte con la *Formación El Paraíso*. Wheeler (1963) afirma que el cambio lateral de facies de la *Formación Churuguara* a la *Formación Castillo* puede ser seguido en el campo, estableciéndose arbitrariamente la división entre ambas formaciones, al oeste de la quebrada Mamoncito.

A lo largo del borde occidental de la cuenca de Falcón continúa en la secuencia la *Formación Castillo*, formada por capas gruesas de areniscas y conglomerados en su parte superior, mientras que en la parte inferior de la formación se observa un predominio de limolitas y arcillas, de color gris, compactas, masivas; las lutitas son fisiles, marrón oscuro, carbonáceas, con delgadas capas de carbón (Wheeler, 1960). La edad de esta formación es Oligoceno a Mioceno Temprano. La localidad tipo aflora en cerro Frío, unos 5 Km. al este de cerro Castillo, estado Falcón. La extensión geográfica de la *Formación Castillo* aflora en una amplia zona semicircular, a lo largo del borde occidental de la cuenca (Wheeler, 1960). Esta formación yace concordantemente sobre las lutitas de Pecaya. Hacia el borde de la cuenca, descansa con discordancia angular sobre rocas eocenas, más adelante, Wheeler (1963) sugiere

que tanto la *Formación Pecaya* como la *Formación El Paraiso*, pasan gradualmente hacia el sur a la *Formación Castillo inferior*. La *Formación Castillo* se depositó en diferentes ambientes, encontrándose facies de aguas someras y salobres en las cercanías de cerro Castillo y de cerro Frío; con facies más marinas hacia la cuenca (Wheeler, 1963).

La unidad que forma la mayor parte de la serranía de San Luis está constituida, predominantemente, por calizas arrecifales macizas y densas con foraminíferos grandes, algas y corales, intercaladas con areniscas de grano fino, arcillosas y calcáreas, lutitas fisiles con nódulos ferruginosas y, hacia el tope, areniscas conglomeráticas con granos y guijarros de cuarzo blanco y ftanita negra, correspondientes a la *Formación San Luís*, de edad Oligoceno – Mioceno Temprano. La localidad tipo está ubicada en el antiguo camino real de Coro-Cabure que cruza la serranía de San Luís, distrito Petit, estado Falcón. Senn (1935) estima un espesor para esta formación de 800-1000 m en la serranía de San Luís. Wheeler (1963) reporta una sección incompleta de 482 m y estima por lo menos 650 m y posiblemente más de 1000 m, donde la formación esté bien desarrollada.

La *Formación San Luís* aflora en la mayor parte de la serranía de San Luis, donde los picos más elevados son las calizas arrecifales típicas de la formación. Se extiende al oeste hasta el río Mitare y al este hasta el valle del río Ricoa. Esta formación se caracteriza por presentar abundantes foraminíferos grandes, corales, algas y pelecípodos. Adicionalmente, corresponde a una facies arrecifal de borde de cuenca con núcleos arrecifales alineados en sentido este-oeste, con depósitos bioclásticos de origen arrecifal hacia el centro de la cuenca de Falcón y facies atrás del arrecife hacia la antigua línea de costa de Paraguaná (Léxico Estratigráfico, 1997).

Por último, en el flanco norte de la serranía de San Luis se encuentra la *Formación Patiecitos*, integrada por una secuencia de lutitas interestratificadas con areniscas y algunas calizas; las lutitas predominan en la parte inferior de la formación, pero la



proporción de arenas incrementa gradualmente hacia la parte superior. La localidad tipo de esta formación está definida en la quebrada Los Patiecitos, en el flanco norte de la serranía de San Luís, distrito Miranda, estado Falcón. La *Formación Patiecitos* aflora a lo largo del flanco norte de la serranía de San Luís y se acuña al este y oeste. Hacia el norte la formación se acuña contra la antigua área positiva de Paraguaná. Wheeler (1960) le asigna edad Oligoceno a la *Formación Patiecitos* y Díaz de Gamero (1989) la restringe al Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano. Esta formación se considera como facies de relleno entre el arrecife de San Luís y la costa de Paraguaná (Wheeler, 1963 y Díaz de Gamero, 1989).

## CAPITULO V

### MARCO GEOLÓGICO LOCAL

#### **Descripción local Formación El Paraíso, quebrada Purureche**

En la quebrada Purureche (estado Falcón) afloran las formaciones El Paraíso y Pecaya. En general la sección está constituida por una intercalación de lutitas y areniscas, estas últimas aumentan su porcentaje hacia el tope además de volverse estratocrecientes (Ariza, 2006).

De acuerdo a las descripciones de Ariza (2006), en la sección de la Formación El Paraíso que aflora en la quebrada Purureche se distinguieron tres intervalos denominados: a) Intervalo lutítico b) Intervalo arenoso – lutítico y c) Intervalo lutítico hacia el tope.

a) Intervalo lutítico: Caracterizado por la intercalación de arcillitas y limolitas. Las arcillitas son de color fresco negro y color meteorizado gris plomo. Se presentan muy compactas y hacia el tope se enriquecen en jarosita, las limolitas que forman capas de espesor aproximado de 5 cm, de color meteorizado marrón rojizo y fresco gris intenso. Este intervalo tiene un espesor de aproximadamente 5 metros.

b) Intervalo arenoso – lutítico: Comienza con una capa de arenisca que marca el contacto concordante y abrupto entre este intervalo y el inferior. Dicha arenisca es de color fresco gris claro y color meteorizado marrón rojizo. Es de grano medio, friable, de forma tabular y posee un alto grado de meteorización.

El intervalo, de aproximadamente 35 metros de espesor, se puede dividir en dos secuencias limitadas por la presencia de una arenisca potente de espesor de 2 metros, de color meteorizado marrón rojizo, presenta granulometría gruesa tendiendo a ser

conglomerática hacia el tope. Los clastos son redondeados y se identificó cuarzo y fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas sostenidos por una matriz de arena gruesa.

La primera secuencia se inicia con un espesor de arcillitas de color fresco negro y color meteorizado gris plomo, se presentan formando láminas de 1 a 2 mm de espesor de forma alargada y poseen alto contenido de jarosita. El espesor de la secuencia es de 8 metros.

Las areniscas en general son de color fresco gris y color meteorizado marrón claro, muestran laminación paralela hacia la base y hacia el tope estratificación paralela, son friables característica que van perdiendo mientras se asciende estratigráficamente. Son granocrecientes hasta volverse conglomeráticas.

Las arcillitas son de color negro y meteorizan a marrón parduzco, aumentan su contenido de jarosita al ascender en la sección y al igual que el grado de laminación paralela (Ariza, 2006).

La segunda secuencia, que se inicia en la arenisca conglomerática de 3 metros, está compuesta por una intercalación de areniscas y lutitas. La diferencia que presenta éste con el intervalo anterior es que aumenta el contenido de areniscas con respecto a las arcillitas. El espesor de esta secuencia es de 29 metros.

Las arcillitas son de color gris oscuro y meteorizan a un color pardo rojizo, en ellas se puede observar laminación paralela. Hacia la base del intervalo su espesor es de 50 centímetros el cual disminuye gradualmente hasta desaparecer en el tope de la secuencia. Presentan jarosita de origen secundario.

Las areniscas son estrato y granocrecientes. En general su color fresco es gris y meteorizan a marrón rojizo. Presentan laminación paralela y son friables hacia la

base, mientras que hacia el tope poseen estratificación paralela. Concreciones y niveles ferruginosos se observaron en dichas areniscas (Ariza, 2006).

Esta secuencia, culmina con una arenisca de 3 metros de espesor, que presenta hacia la base la precipitación de sulfuros como mineral secundario. Es masiva y de granulometría fina.

c) Intervalo lutítico hacia el tope: Se encuentra en contacto concordante y abrupto con la arenisca de 3 metros descrita anteriormente. Es una secuencia constituida por la intercalación de arcillitas y limolitas. El espesor total de esta sección es de 5 metros. Las arcillitas son de color negro y meteorizan a gris plomo, presentan un espesor de aproximadamente 10 centímetros que permanece constante a lo largo de todo el intervalo. Las limolitas forman capas de aproximadamente 5 centímetros son de color gris plomo y meteorizan a tonalidades marrones rojizas.

Hacia el tope de esta secuencia, se encuentra una capa de lignito de 5 centímetros que está en contacto con una arenisca masiva de 2 metros, de granulometría fina, color gris y meteoriza a tonalidades rojizas, la cual corresponde al límite superior de la secuencia y marca el contacto con la Formación Pecaya (concordante y abrupto) (Ariza, 2006).

La columna litoestratigráfica generalizada para la quebrada Purureche en el estado Falcón, realizada por Ariza (2006) y modificada para este trabajo, puede apreciarse en el anexo 1.

## **CAPITULO VI**

### **ANTECEDENTES**

La cuenca de Falcón ha sido objeto de diferentes estudios a lo largo del transcurso de varios años. Debido a esto, en primera instancia, se hace una recopilación de los trabajos realizados en base a la evolución, estratigrafía y desarrollo de Falcón como una cuenca individualizada, los mismos se muestran a continuación:

Los primeros estudios sobre la estratigrafía de la cuenca de Falcón fueron llevados a cabo por Wiedenmayer (1924) citado en Wheeler (1960). Seguidamente Garner (1926) precisó las descripciones originales de las formaciones El Paraíso, Guarabal y San Luís; de edad Oligoceno y Mioceno Temprano, en sus respectivas localidades tipos para cada formación. En ese mismo año, Hodson (1926) realizó un estudio sobre las lutitas de la Formación El Paraíso, caracterizándolas como lutitas negras intercaladas con capas de carbón y areniscas cuarcíticas, cuya localidad tipo está ubicada en la quebrada El Paraíso, distrito Bolívar, estado Falcón.

Senn (1935) estableció una correlación de los estratos de la Formación El Paraíso con la parte superior de la Formación Misoa - Trujillo, de edad Eoceno Medio-Tardío. El mismo autor en 1940, demarca una nueva correlación de El Paraíso con las cuarcitas de El Mojino y las coloca por debajo de las lutitas de Tupure.

Las unidades correspondientes a la región norcentral y noroccidental del estado Falcón fueron datadas mediante el uso de la información suministrada por ciertas especies de moluscos (Halse, 1937). De igual forma, Liddle (1928), realizó dataciones de las unidades litoestratigráficas presentes en Falcón norcentral y noroccidental con base en análisis e interpretación de los moluscos presentes.

La Formación El Paraíso en la cuenca de Falcón fue correlacionada con las formaciones Omuquena y Mene Grande (Eoceno Tardío) por Sutton (1946). Adicionalmente, Rivero (1956) sugiere que la Formación El Paraíso es equivalente a las cuarcitas de El Mojino y las areniscas de San Juan de la Vega, con lo cual deben incluirse todas estas secuencias bajo el primer nombre, ya que tiene mayor prioridad, y se considera que la edad apropiada para esta formación es Oligoceno.

Wheeler (1963) realizó una descripción muy detallada de la Formación El Paraíso, donde incluye en ella a las areniscas de San Juan de La Vega, colocándola de esta forma en la parte inferior del Grupo Mitare. Por otro lado, la existencia de rocas ígneas de naturaleza basáltica en la parte central de la cuenca de Falcón que intrusionan a la Formación El Paraíso, fue enunciada en el trabajo de Coronel (1970).

Los estudios de Hunter & Ferrell (1972) demostraron que no hay equivalencia alguna entre las areniscas de San Juan de La Vega y la Formación El Paraíso, debido a la existencia de una gruesa sección lutítica entre ellas.

Díaz (1976) establece las relaciones de facies en la parte central de la cuenca de Falcón durante el Oligoceno y Mioceno Temprano, con base en el estudio de unidades litológicas y la microfauna presente en ellas. Por su parte, Díaz de Gamero (1977) estudió detalladamente la Formación El Paraíso en todos sus aspectos, ratificando su separación de las areniscas de San Juan de la Vega y, por lo tanto, del Grupo Mitare. La autora propone eliminar de la literatura estratigráfica el término del Grupo Mitare.

Muessig (1978) realizó un estudio de las intrusiones ígneas de edad Oligoceno-Mioceno en la región central de Falcón. Mientras que Lena (1979) y Medina (1979) describen la geología sedimentaria de la zona ubicada entre los distritos Miranda y Democracia, en el estado Falcón.

La estructura y tectónica de edad Cenozoico de la cuenca de Falcón fue analizada por Muessig (1984). Adicionalmente realiza estudios de paleomagnetismo de las intrusiones ígneas de la parte central de esta cuenca para integrarlos dentro de las interpretaciones geológicas. Otros estudios sobre la Formación El Paraíso en el centro de la cuenca de Falcón, están representados en el trabajo de Macellari (1995), el cual interpreta la sedimentación y la variedad de facies litológicas presentes en dicha formación.

Escorihuela y Rondón (2002), realizaron una caracterización química de los diferentes cuerpos ígneos que se encuentran en el centro de la cuenca de Falcón, y nombran aquellos que se encuentran intrusionando a la Formación El Paraíso.

Berroterán y Ziritt (2004), realizaron una interpretación estructural que determina la evolución del plegamiento de la zona situada entre los poblados de Purureche, estado Falcón y Baragua, estado Lara.

Romero y Salas (2004) determinaron las litofacies de las formaciones que integran la zona de estudio que corresponde al sureste de la Formación Pedregal, estado Falcón. De igual manera interpretaron los ambientes de depositación que permitieron obtener la distribución espacial de las diversas facies sedimentarias en la zona.

Como pudo apreciarse en la breve recopilación anterior, diferentes estudios han sido realizados para interpretar la evolución estratigráfica, paleontológica y estructural de la cuenca de Falcón; y ellos representan sólo una pequeña muestra de los diversos aportes que se han obtenido con el transcurrir de los años. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han concentrado en caracterizar e interpretar muchas de las formaciones fácilmente expuestas a lo largo de la cuenca de Falcón, pero pocos son los trabajos que se han enfocado a interpretar con exactitud el límite Eoceno – Oligoceno y el inicio de la sedimentación del Oligoceno dentro de la región sur – central de la cuenca de Falcón

Ahora bien, con respecto al área de la *quimioestratigrafía* se han llevado a cabo diversos estudios tanto en el ámbito nacional como internacional. La siguiente sección corresponde a los trabajos previos realizados con base en diferentes análisis quimioestratigráficos.

### **Antecedentes nacionales sobre quimioestratigrafía**

Comencemos esta sección con varios trabajos realizados a nivel nacional en cuencas y/o zonas diferentes a Falcón. De esta forma, podemos apreciar como se han desarrollado diversos estudios que integran la información geoquímica, sedimentológica, estratigráfica y paleontológica para llevar a cabo interpretaciones quimioestratigráficas en otras cuencas venezolanas:

Camposano y Martínez (2000) desarrollaron una caracterización química por fluorescencia de rayos X y radiométrica de secciones estratigráficas pertenecientes a las formaciones Barco y Mirador, en el estado Táchira. Esto les permitió dividir a las formaciones en unidades quimio-radiométricas, cuyos límites corresponden a los límites de las unidades sedimentarias.

Martínez (2001) y Reátegui (2001) realizaron un estudio quimioestratigráfico de las formaciones Barco y Mirador, estado Táchira. Ellos determinaron la concentración de 26 elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, definiendo de esta manera límites de quimiofacies, para luego realizar una interpretación geoquímica de cada una de ellas apoyada con el tratamiento estadístico de los datos.

González y Sánchez (2001) llevaron a cabo la caracterización química y radiométrica, mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de la energía y espectrometría gamma multicanal respectivamente, de dos secciones estratigráficas de la Formación La Luna en el estado Táchira. De igual forma, los análisis empleados permitieron caracterizar y dividir a la Formación La Luna en diferentes quimiofacies, para posteriormente correlacionarlas en dos secciones del estado Táchira.



Mata (2001) realizó un estudio quimioestratigráfico para determinar diferentes quimiofacies con sus respectivos límites; así como caracterizar los posibles paleoambientes asociados dentro de la Formación La Luna, en el estado Táchira. En este trabajo se evaluó el comportamiento y la distribución vertical de 34 atributos químicos y biomarcadores. Para ello se utilizaron métodos de análisis exploratorio de datos, estadística multivariada y curvas de acumulación para determinar y caracterizar a las quimiofacies.

Noguera y Yépez (2002) presentaron una caracterización química de las secciones estratigráficas de las formaciones Naricual y Querecual, en los estados Anzoátegui y Monagas, respectivamente.

Montilla (2006) llevó a cabo un estudio geoquímico y quimioestratigráfico en dos secciones del Cretácico Superior en el estado Táchira. El fundamento de este trabajo fue establecer las características ambientales y fisicoquímicas de la Formación Colón. El análisis de 49 elementos permitió identificar ocho quimiofacies; así como determinar el régimen climático, la composición de la fuente de sedimentos y las condiciones óxido – reductoras reinantes al momento de la depositación de estas secciones estratigráficas.

Una vez apreciado como se han implementado las técnicas quimioestratigráficas en otras cuencas y/o secciones sedimentarias, nos enfocaremos ahora en aquellos estudios realizados específicamente dentro de la cuenca de Falcón, entre los que podemos nombrar:

Castro (2002) realizó un estudio quimioestratigráfico en la sección superior de la Formación Cerro Pelado. Su estudio se basó en determinar las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, para identificar e interpretar las posibles quimiofacies.

Guerra (2002) llevó a cabo una caracterización quimioestratigráfica de la sección inferior de la Formación Cerro Pelado, estado Falcón. Para ello, determinó la concentración de elementos mayoritarios (Al, Fe, Mg, Ca, Ti, K, Si), minoritarios (Mn, Ba, Sr, Cr, Cu, Zn, Ni, V, B, Li, Rb, Y, Ce, La, Th, P, Mo y U) mediante la técnica ICP – EEA y el análisis de la concentración de % COT, % de  $\text{CO}_3^{=}$  y % S. Los resultados obtenidos identificaron la posible fuente de los sedimentos, así como las condiciones redox de la sedimentación.

Bermúdez, López y Troconis (2003) verificaron la potencialidad generadora y almacenadora de hidrocarburos de la Formación Cerro Pelado. La finalidad de este trabajo fue caracterizar petrográficamente las rocas pertenecientes a la Formación Cerro Pelado, determinar el grado diagenético alcanzado, definir las litofacies presentes en la columna sedimentaria y establecer las unidades quimioestratigráficas a partir de la determinación de elementos químicos mayoritarios. Los resultados de los análisis quimioestratigráficos fueron comparados con las litofacies definidas, y finalmente pudo determinarse la procedencia de los sedimentos asociados a las rocas de esta unidad.

Leal y Rivero (2004) caracterizaron químicamente la sección superior de la Formación El Paraíso en el estado Falcón, mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (FRX-DE). Realizaron la determinación de 8 litofacies e hicieron una comparación con los análisis obtenidos químicamente. Establecieron que el ambiente de sedimentación de la Formación El Paraíso corresponde a un ambiente lagunar para la parte basal, de marisma alta para la parte media y de marisma baja para la parte superior de la secuencia.

Montero et al. (2005) aplicaron análisis quimioestratigráficos a tres secciones de la Formación Cerro Pelado, en el estado Falcón. La finalidad de este estudio radicó en probar una metodología estadística para identificar las posibles quimiofacies a través del método de agrupamiento (estadística multivariada). Estas quimiofacies

determinadas por métodos estadísticos fueron posteriormente utilizadas para establecer correlaciones entre las secciones estratigráficas estudiadas.

De Abreu (2005) llevó a cabo un estudio quimioestratigráfico de las lutitas de la Formación El Paraíso que afloran en la quebrada Paraíso, estado Falcón. En este trabajo se emplearon análisis estadístico multivariado, perfiles quimioestratigráficos y curvas de acumulación porcentual de elementos mayoritarios y traza. Los resultados permitieron establecer dos quimiofacies bien marcadas, así como precisar la posible composición del área fuente y el grado de alteración química de la sección estratigráfica.

Méndez (2006) utilizó herramientas quimioestratigráficas para evaluar la proveniencia de los sedimentos que dieron origen a la Formación Pecaya (Estado Falcón). En este trabajo se utilizaron gráficos propuestos por diversos autores en trabajos anteriores como Cr/V vs Y/Ni y Th/Co vs La/Sc, mediante los cuales se pudo inferir que la fuente de sedimentos presenta afinidad con una composición metamórfica con aporte félsico. Este resultado le permitió sugerir a los Andes como una posible fuente de sedimentos.

Ariza (2006) caracterizó quimioestratigráficamente el límite Eoceno - Oligoceno en la región sur-central de la cuenca de Falcón mediante fluorescencia de rayos X. Esta investigación llevó a cabo un levantamiento geológico y muestreo en una sección ubicada en la localidad de Baragua, estado Lara, donde afloran las formaciones El Paují, Santa Rita y Jarillal del Eoceno y las formaciones Churuguara – Castillo sin diferenciar de edad Oligoceno. Adicionalmente, para establecer comparaciones entre la sección de Baragua y la sección que aflora en la localidad de Purureche, estado Falcón, realizó un levantamiento geológico y muestreo de la Formación El Paraíso, de edad Oligoceno. A partir de este trabajo, surge la necesidad de ampliar los estudios de quimioestratigrafía y geoquímica sedimentaria con técnicas más precisas en ese muestreo efectuado en la Formación El Paraíso, quebrada Purureche, estado Falcón.

Como pudo observarse, son pocos los trabajos de la cuenca de Falcón, que han utilizado hasta ahora, las ventajas que ofrece la poderosa herramienta de la quimioestratigrafía para caracterizar el límite Eoceno – Oligoceno e inicio de la sedimentación del Oligoceno. Por lo tanto, caracterizar geoquímicamente este último tiempo geológico sería el mayor aporte para la interpretación y análisis de la región sur – central de la cuenca de Falcón.

### **Antecedentes internacionales sobre quimioestratigrafía**

En esta sección vale la pena mencionar algunos de los trabajos realizados a nivel internacional sobre quimioestratigrafía. A continuación se muestran algunos de ellos:

Piovano et al. (1999) utilizaron trazadores geoquímicos de roca fuente para analizar una secuencia sedimentaria en Argentina de edad Cretáceo – Cuaternario. Dicha secuencia proviene de un complejo metamórfico – plutónico conocido, por consiguiente, se aplicaron análisis quimioestratigráficos para determinar cambios geoquímicos durante la producción de los sedimentos. Adicionalmente, los autores evaluaron la relación que existe entre la composición química y la textura de las rocas para precisar los efectos que controlan los procesos de transporte y el tamaño de grano. Mediante tratamientos estadísticos de los datos mostraron como ciertas relaciones interelementales (Cr/Th, La/Cr, Th/Sc, entre otras) pueden ser utilizadas como herramienta diagnóstica para identificar proveniencia sedimentaria.

Bellanca et al. (1999) muestran un análisis geoquímico y sedimentológico de las lutitas negras de la cuenca Belluno en Italia. El objetivo de este estudio fue determinar el ambiente fisicoquímico durante la depositación y la diagénesis temprana de esta secuencia. Esta investigación aportó información útil para el entendimiento de la evolución paleoclimática y paleogeográfica del mar de Tetis.

Cullers (2000) estudió la geoquímica de diferentes lutitas, limolitas y areniscas de la cuenca central de Colorado, USA. Estas rocas fueron evaluadas petrográfica y

químicamente mediante las concentraciones de los elementos mayoritarios, trazas y tierras raras. El autor comparó las relaciones elementales en las diferentes fracciones de tamaño de grano para determinar si dan o no la misma información sobre la proveniencia sedimentaria.

Rimmer (2004) aplicó indicadores geoquímicos para elucidar los posibles ambientes paleodepositacionales de tres unidades de las lutitas negras de la cuenca central de Los Apalache, USA. En este estudio las relaciones de los elementos C, Fe y S permitieron determinar bajo que condiciones óxido – reductoras se acumularon los sedimentos. Otras relaciones geoquímicas resultaron buenos indicadores de las condiciones redox variables dentro de estas lutitas negras, tales como: Ni/Co, V/Cr y V/(V+Ni); siendo ésta última relación la que representa los regímenes de concentración de oxígeno más bajo que los otros indicadores.

Andersson et al. (2004) evaluaron la proveniencia sedimentaria y la quimioestratigrafía de un complejo de abanicos submarinos (turbiditas) en la cuenca Karoo, al sur de África. Los cambios en las relaciones  $TiO_2/Al_2O_3$ ,  $La/(La+Lu)$  y  $Th/(Th+Y)$  obtenidas en este trabajo, sugieren un incremento en el aporte máfico hacia el sistema depositacional con el tiempo. De igual forma, evaluaron el índice de alteración química para precisar las intensidades de los regímenes de meteorización.

Font et al. (2006) determinaron la concentración de diferentes elementos trazas en calizas neoproterozoicas que suprayacen a la Formación Puga, cratón amazónico, Brasil. De igual forma las herramientas quimioestratigráficas permitieron inferir condiciones óxido-reductoras del ambiente de depositación y realizar una integración de los datos de geoquímica elemental con el marco geológico correspondiente.

Los trabajos expuestos anteriormente representan una pequeña muestra de los diversos análisis quimioestratigráficos que se han desarrollado a nivel mundial, los mismos poseen diferentes enfoques dependiendo del objetivo de cada estudio, pero al

final todos persiguen determinar la composición de la roca fuente así como las condiciones fisicoquímicas (redox) y climáticas, que prevalecieron al momento de la acumulación de los sedimentos en las respectivas cuencas sedimentarias, mediante técnicas quimioestratigráficas.

## **CAPÍTULO VII**

### **METODOLOGÍA**

La presente sección abarca una descripción detallada de la metodología experimental que se llevó a cabo para alcanzar los objetivos planteados. En este sentido, se indicará cada una de las etapas que conformaron este estudio: campo, laboratorio e interpretación de los datos obtenidos.

#### **Etapas de campo**

Las muestras analizadas para esta investigación fueron recolectadas originalmente por Ariza (2006) como parte de un proyecto adscrito a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Por consiguiente, previo a dar inicio a la fase de campo, fue necesario realizar una extensa revisión y recopilación bibliográfica, la cual incluyó la búsqueda de los trabajos que sirvieron de antecedentes para la elaboración del proyecto, así como la metodología a seguir en el desarrollo del mismo. De igual forma, resultó indispensable la revisión de fotografías aéreas y compilación de cartas topográficas, para la ubicación de los posibles afloramientos a visitar, así como también reconocer las vías de acceso.

Una vez en campo, Ariza (2006) llevó a cabo un levantamiento geológico en la sección de Purureche, al sur del estado Falcón. Este levantamiento geológico incluyó: elaboración de una poligonal, identificación de las litologías presentes para la realización de las columnas estratigráficas, tomando en cuenta todas las características de las rocas (color fresco y meteorizado, granulometría, presencia o ausencia de fósiles).

La recolección de las muestras se efectuó lo más sistemáticamente posible, cada 50 centímetros. En este sentido, de las 93 muestras recolectadas en la sección de Purureche, sólo 64 muestras cumplieron con los estándares para aplicar estudios quimioestratigráficos tales como: tamaño de grano, grado de alteración química, ubicación exacta de la muestra en la columna estratigráfica y cantidad de muestra. Cabe destacar que estas 64 muestras se encuentran distribuidas a lo largo de todo el espesor de la Formación El Paraíso que aflora en la quebrada Purureche, región sur-central del estado Falcón.

En el anexo 2 pueden apreciarse algunas fotografías de los afloramientos muestreados en la sección de Purureche, estado Falcón.

### **Etapa de laboratorio**

El tratamiento de las muestras seleccionadas y las determinaciones analíticas elementales abarcaron los siguientes pasos:

#### **Tratamiento de las Muestras**

***Secado:*** Se aplicó esta técnica para aquellas muestras que presentaron cierto grado de humedad antes de proceder a realizar la disgregación. Se efectuó dejando las muestras al aire libre por 24 horas al menos, a fin de equilibrarse con la humedad ambiental.

***Disgregación y trituración mecánica previa:*** Se realizó este paso antes de pulverizar las muestras. Las muestras fueron golpeadas con una piqueta sobre una plancha de acero con hojas limpias, para evitar una posible contaminación.

***Pulverizado:*** Luego del secado de las muestras que lo ameritaron y la disgregación de las mismas, se procedió a pulverizarlas. Para ello, se tomó aproximadamente 30 gramos de la muestra y se colocaron en el equipo de molienda Shatterbox. Este



equipo está compuesto por una cámara de carburo de tungsteno formada por 3 piezas movibles que, al vibrar pulverizan las muestras. El tiempo de pulverización de las muestras fue variable, dependiendo del tipo de litología a analizar, pero generalmente varió entre 2 a 3 minutos por muestra. Posteriormente, en envases plásticos transparentes con tapas y debidamente rotulados, fueron almacenadas las muestras pulverizadas

***Preparación de las soluciones acuosas:*** Una fracción de cada una de las muestras pulverizadas se llevó a solución mediante la técnica de fusión alcalina (Liberatore, 1993, 1994). Esta técnica requiere inicialmente la preparación de un fundente, el cual consiste de una mezcla de metaborato-tetraborato de litio.

Para obtener el metaborato de litio se pesó alrededor de 18,5 g de carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) y 30,7 g de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) en una cápsula de porcelana, la cual fue colocada en la mufla a 400 °C por 4 horas. Fue necesario repetir este procedimiento 10 veces para generar la mayor cantidad posible de metaborato de litio sin tamizar. Posteriormente, todas estas fracciones fueron pulverizadas y tamizadas en una malla 230 (0,063 mm) para obtener un tamaño de grano fino. Finalmente, el metaborato de litio tamizado se mezcló en proporciones iguales (1:1) con el tetraborato de litio anhidro. De esta forma, quedó debidamente preparado el fundente.

Se colocó una fracción de la muestra a analizar (aproximadamente  $0,2500 \pm 0,0001$  g) con la mezcla de metaborato-tetraborato de litio preparada (aproximadamente  $1,2500 \pm 0,0001$  g) dentro de un crisol de grafito, el cual posteriormente fue colocado en la mufla a una temperatura de 900 °C por 45 minutos. Esta fusión generó una perla, la cual, luego de enfriada a temperatura ambiente, fue disuelta en un beacker que contenía 65 mL de ácido nítrico al 10% con agitación constante y a una temperatura controlada de 50 °C.

Una vez disuelta la perla, la solución formada fue filtrada con lana de vidrio y aforada en balones de 100 mL. Estas soluciones fueron almacenadas en frascos plásticos con sus tapas y debidamente rotulados, para posteriormente medir los atributos químicos de interés.

### **Análisis Químicos**

Esta fase comprendió la determinación de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, el porcentaje de carbono total ( $C_T$ ) y el contenido de azufre total ( $S_T$ ). Para ello se aplicaron las siguientes técnicas analíticas.

#### **Determinación de elementos mayoritarios, minoritarios y trazas**

Para determinar las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas en las muestras disueltas, se utilizó un espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (EEO-IAP), modelo ULTIMA 2 marca HORIBA Jobin Yvon (figura 17).

Con esta técnica se determinó la concentración de los siguientes 20 elementos químicos: Al, Ba, Ca, Ce, Cr, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sc, Si, Sr, Ti, V, Y, Zn y Zr. Las curvas de calibración para los análisis fueron construidas con patrones certificados para cada elemento. Adicionalmente se utilizaron patrones internacionales de rocas para validar la exactitud y precisión del método.

La longitud de onda y los límites de determinación para cada elemento analizado se presentan en la tabla 1. Estos límites de determinación se establecieron tomando tres veces el valor de la concentración equivalente al fondo (BEC = “Background Equivalent Concentration”).



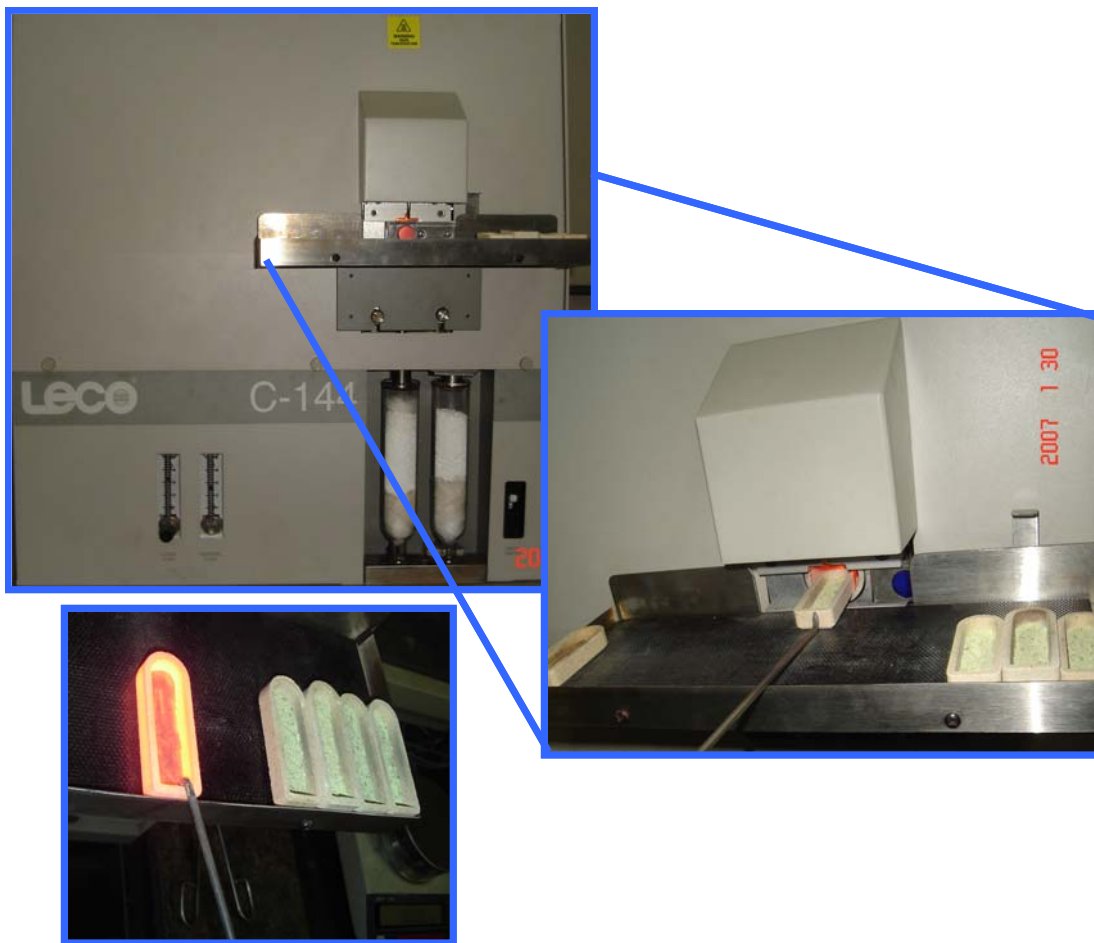
**Figura 17:** *Espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (EEO-IAP), modelo ULTIMA 2 marca HORIBA Jobin Yvon.*

**Tabla 1:** Longitud de onda y límite de determinación para cada elemento químico

| EEO-IAP   |                       |                               |
|-----------|-----------------------|-------------------------------|
| ELEMENTOS | Longitud de Onda (nm) | Limite de Determinación (ppm) |
| Al        | 396,152               | 33,58                         |
| Ba        | 455,403               | 0,16                          |
| Ca        | 393,366               | 0,20                          |
| Ce        | 413,765               | 0,03                          |
| Cr        | 205,552               | 0,01                          |
| Cu        | 324,754               | 0,02                          |
| Fe        | 259,94                | 5,43                          |
| La        | 408,671               | 0,03                          |
| Mg        | 280,27                | 0,48                          |
| Mn        | 259,373               | 0,07                          |
| Ni        | 231,604               | 0,02                          |
| Pb        | 283,306               | 0,02                          |
| Sc        | 361,384               | 0,002                         |
| Si        | 251,611               | 13,73                         |
| Sr        | 407,771               | 0,07                          |
| Ti        | 324,199               | 0,45                          |
| V         | 311,071               | 0,01                          |
| Y         | 371,029               | 0,002                         |
| Zn        | 213,856               | 0,04                          |
| Zr        | 339,198               | 0,03                          |

#### **Determinación de carbono total**

El porcentaje de carbono total en cada una de las muestras fue determinado con un analizador marca LECO, modelo C-144 (figura 18).



**Figura 18:** *Analizador LECO modelo C-144*

El fundamento principal de este equipo es el método de combustión seca. Para ello, se colocó alrededor de 175 mg de muestra pulverizada debidamente pesados en una navecilla. A esta fracción de las muestras se le agregó una pequeña cantidad de trióxido de tungsteno, utilizado como un acelerador de combustión. La navecilla conteniendo esta mezcla fue introducida en el horno a una temperatura de 1490 °C.

Mediante una corriente de oxígeno tiene lugar la combustión total de la muestra, y el CO<sub>2</sub> generado se hace pasar por una serie de sólidos en los que tienen lugar la absorción de agua y de sólidos suspendidos. El CO<sub>2</sub> generado es llevado a un detector de infrarrojo que mide la absorción correspondiente a la vibración de “stretching” o

estiramiento del doble enlace C=O. Un procesador convierte la señal en forma digital y el resultado directo del porcentaje de carbono en la muestra aparece en la computadora asociada al equipo. La curva de calibración se llevó a cabo con los patrones del laboratorio, tanto internacionales como de referencia.

### **Determinación de Azufre Total**

El porcentaje de azufre total en cada una de las muestras fue precisado con un analizador marca LECO, modelo SC-432 (figura 19).



**Figura 19:** *Analizador LECO modelo SC-432*

El fundamento principal de este equipo es el método de combustión seca similar al analizador del carbono mencionado en la parte anterior. Por consiguiente, se colocó de igual forma, alrededor de 300 mg de muestra pulverizada debidamente pesados en una navecilla, también conocidas como crisoles de mullita. A cada fracción de las muestras pesadas se le agregó una pequeña cantidad de trióxido de tungsteno (LECO

Part. No. 502 – 301), utilizado como un acelerador de combustión. La navecilla conteniendo esta mezcla fue introducida en el horno a una temperatura de 1375 °C. La combustión total de la muestra tiene lugar mediante una corriente de oxígeno, en este caso el SO<sub>2</sub> generado se hace pasar por una serie de sólidos en los que tienen lugar la absorción de agua y de sólidos suspendidos.

El SO<sub>2</sub> generado es llevado a un detector de infrarrojo que mide la absorción correspondiente a la vibración de “stretching” o estiramiento del doble enlace S=O. Un procesador convierte la señal en forma digital y el resultado directo del porcentaje de azufre en la muestra aparece en el dial o pantalla del equipo. La calibración se llevó a cabo con los patrones del laboratorio, tanto internacionales como de referencia.

#### **Determinación de volátiles**

Se pesaron fracciones de la muestra pulverizada ( $2,0000 \pm 0,0001$  g) en cápsulas de porcelana, y las mismas fueron colocadas en una mufla a 900 °C por espacio de dos (2) horas. La finalidad de este análisis, fue calcinar la muestra hasta eliminar por completo toda la fracción volátil integrada por agua, dióxido de carbono, entre otros.

Una vez transcurrido el lapso de tiempo en la mufla, se sacaron los crisoles, se pesaron y se repitió este procedimiento indicado hasta obtener peso constante. El porcentaje en peso de los compuestos volátiles contenidos en las muestras pudo calcularse mediante la diferencia de pesos. El anexo 3 muestra los resultados generados con este ensayo por muestra.

Como puede apreciarse en el anexo 3, la sumatoria de los óxidos mayoritarios más el porcentaje de volátiles en las rocas debe dar un valor cercano al 100 %. Sin embargo, al considerar los posibles errores analíticos, pudo establecerse un rango aceptable entre 85 y 100 %.

### **Etapa de interpretación**

Se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos obtenidos a través de las diversas técnicas analíticas utilizadas. El tratamiento estadístico de los datos constó en primera instancia de un *análisis de estadística descriptiva*.

La estadística descriptiva estudia la distribución de los datos de una población dando una idea de la tendencia que adoptan los mismos, ya sea hacia valores altos, bajos o intermedios. Está fundamentada en la simple realización de un *análisis exploratorio de datos*, para identificar y localizar la mediana de las muestras, el grado de dispersión de los datos centrales (cuartiles), los valores anómalos y detectar los diferentes patrones de distribución que pueden tener las concentraciones de los elementos analizados (De Abreu, 2005).

Para aplicar la estadística descriptiva a la matriz de los datos se aplicó el paquete estadístico STATGRAPHICS PLUS. Esta aplicación permitió determinar la mediana, los cuartiles, los valores anómalos, las cajas gráficas, los histogramas de frecuencia y las pruebas de normalidad.

Seguidamente se realizó un análisis de estadística multivariada, el cual estuvo integrado por las siguientes técnicas: análisis de componentes principales, análisis de factores y el análisis por agrupamiento (cluster y cluster constrained). Todas estas pruebas estadísticas fueron determinadas por los paquetes STATGRAPHICS PLUS y MVSP, respectivamente.



## **CAPÍTULO VIII**

### **DISCUSION DE RESULTADOS**

En este capítulo se presenta la discusión e interpretación de los resultados obtenidos. La estructura mostrada a continuación consta de un análisis del comportamiento de la geoquímica sedimentaria para las muestras de la Formación El Paraíso, seguido de los patrones mostrados por los datos ante la aplicación de la estadística descriptiva y multivariada. Y finalmente, la definición de las posibles quimiofacies integradas con los perfiles geoquímicos y las curvas de acumulación porcentual, con la finalidad de generar una adecuada interpretación global de los resultados logrados.

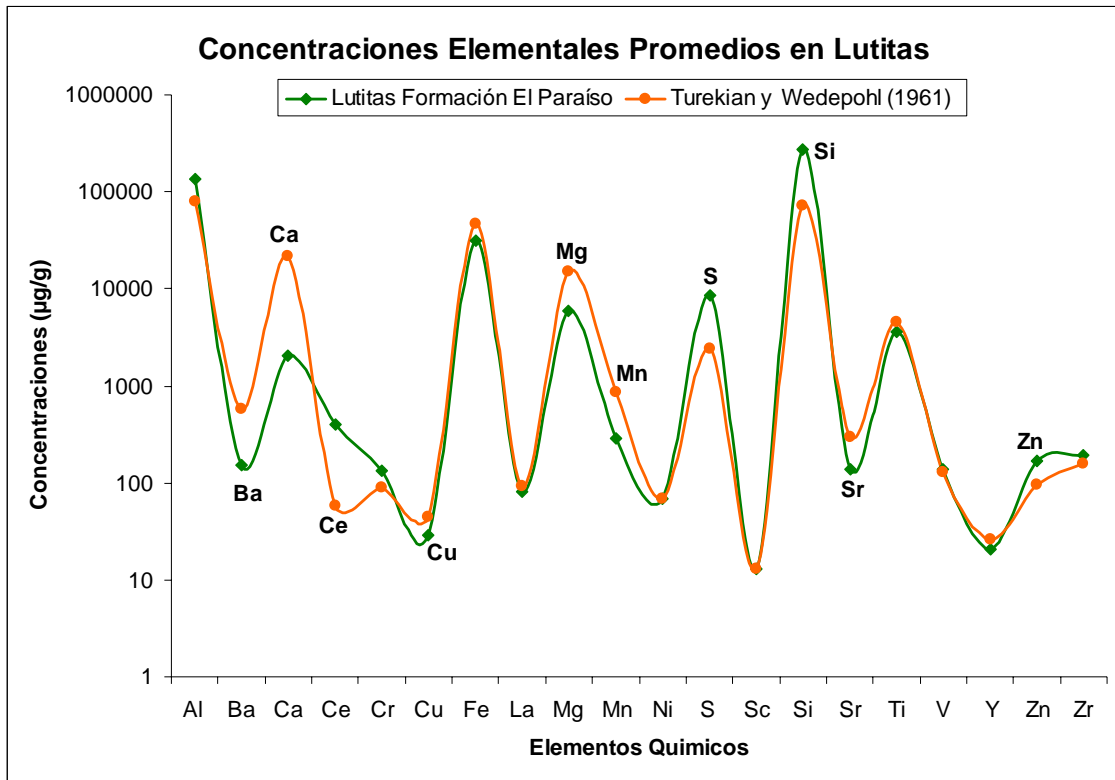
Antes de comenzar la discusión de los resultados, es necesario indicar que las concentraciones de los elementos químicos determinados en las muestras analizadas se encuentran en el anexo 4.

#### **Geoquímica de las rocas sedimentarias**

##### **Lutitas de la Formación El Paraíso vs. Lutita promedio mundial**

Una vez precisada todas las concentraciones de cada uno de los atributos químicos medidos en las muestras, se tomó para este primer análisis, las concentraciones promedios de los elementos químicos medidos en las lutitas de la Formación El Paraíso, que aflora en la quebrada Purureche, para compararlos con la composición de la lutita promedio mundial.

Para ello se consideró los valores reportados por Turekian y Wedepohl (1961), y los valores más recientes de las lutitas australianas Post Arqueano [*PAAS - Post Archean Australian Shales*] (Cullers, 2002) [anexo 5 – figuras 20 y 21, respectivamente].

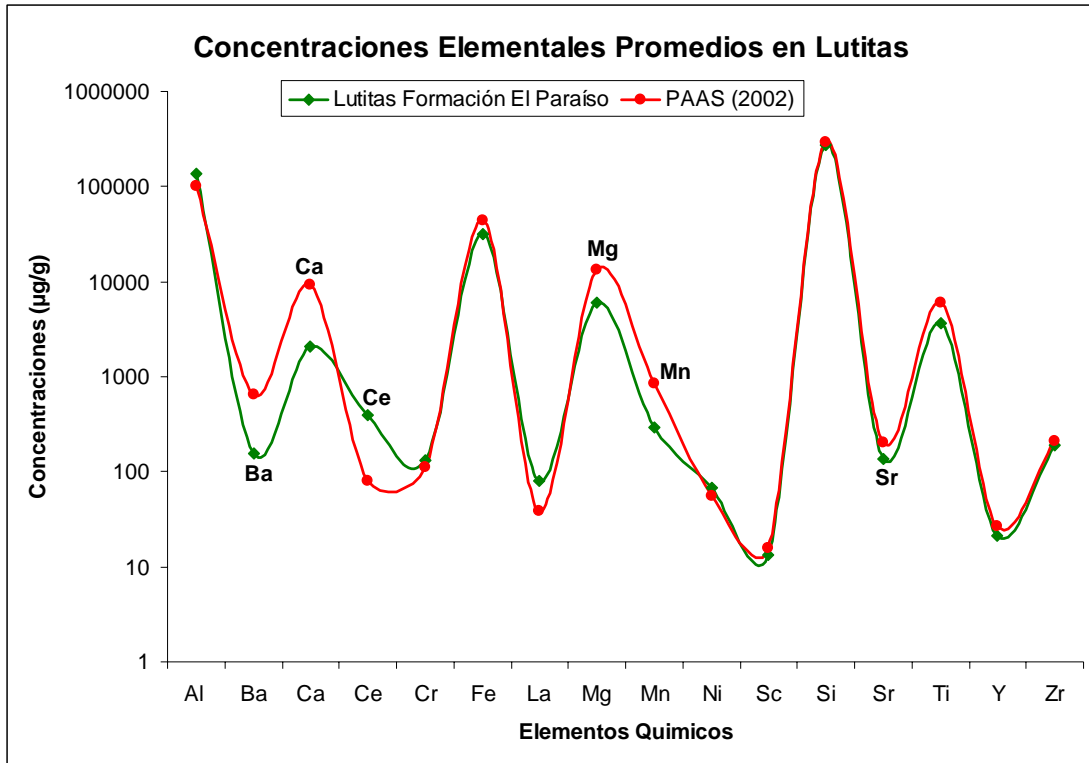


**Figura 20:** Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso y la lutita promedio mundial reportada por Turekian y Wedepohl (1961).

Como podemos apreciar en la figura 20, ambos patrones de distribución se solapan, indicando similitud en el comportamiento de ambos tipos de rocas. En otras palabras, puede establecerse que las lutitas de la Formación El Paraíso, son composicionalmente equivalentes a la lutita promedio mundial reportada por Turekian y Wedepohl (1961). Sin embargo, existen pequeñas diferencias en las concentraciones de algunos elementos tales como: Ba, Ca, Ce, Cu, Mg, Mn, S, Si, Sr y Zn.

Con respecto a la figura 21, puede establecerse de igual forma, que los valores de las concentraciones elementales de la lutita promedio australiana Post Arqueano [PAAS] (2002) son composicionalmente equivalentes a las lutitas de la Formación El Paraíso. Por consiguiente, ambos patrones de distribución se solapan, indicando de igual forma, similitud en el comportamiento de ambos tipos de rocas. En esta comparación

para los elementos reportados, existen también ciertas diferencias no muy significativas en las concentraciones de algunos elementos tales como: Ba, Ca, Ce, Mg, Mn y Sr.



**Figura 21:** Comparación de las concentraciones promedio para las lutitas de la Formación El Paraíso y la lutita promedio australiana Post Arqueano [PAAS] (2002).

En las figuras anteriores puede observarse que el elemento que presenta mayor enriquecimiento relativo en las lutitas de la Formación El Paraíso es el Ce. Este elemento suele estar enriquecido en las fracciones de tamaño de grano limo – arcilla. Por el contrario, es muy común que la concentración de este elemento traza en la fracción arena sea baja debido a la dilución por la presencia de cuarzo. Sin embargo, a pesar de que las relaciones elementales son afectadas por la distribución del tamaño de grano de los sedimentos, la información que suministran los mismos, puede ser utilizada como perfectos indicadores geoquímicos.

Un resumen de las sutiles discrepancias en las concentraciones de los elementos químicos mencionados para cada tipo de lutita comparada puede apreciarse en la tabla 2.

**Tabla 2:** Cuadro resumen de las diferencias químicas entre las lutitas de la Formación El Paraíso comparadas con las lutitas promedio mundial reportadas.

| <b>Lutitas promedio mundial</b> | <b>Lutitas de la Formación El Paraíso.</b> |                             |
|---------------------------------|--|-----------------------------|
|                                 |  | Elementos Químicos          |
| <b>Turekian y</b>               | Enriquecimiento relativo                   | Ce – S – Si - Zn            |
| <b>Wedepohl (1961)</b>          | Empobrecimiento relativo                   | Ba – Ca – Cu – Mg – Mn - Sr |
| <b>PAAS</b>                     | Enriquecimiento relativo                   | Ce                          |
| <b>(Cullers, 2002)</b>          | Empobrecimiento relativo                   | Ba – Ca– Mg – Mn - Sr       |

De la tabla anterior puede concluirse, a manera general, que el empobrecimiento relativo de las lutitas de la Formación El Paraíso en los elementos Ca, Mg, Mn y Sr, es atribuido a cambios composicionales característicos de cada tipo de roca. En otras palabras, las lutitas de la Formación El Paraíso son de carácter menos calcáreo en comparación con las lutitas promedio mundial. Este resultado fue validado, no sólo en campo, sino también al determinar los bajos porcentajes de carbono total en las muestras de rocas analizadas.

Por su parte, como se mencionó anteriormente, el enriquecimiento relativo de Ce en las lutitas de la Formación El Paraíso indica la fuerte afinidad química de este elemento a la fracción limo – arcillosa; pero adicionalmente puede estar dando indicios de la posible composición del tipo de fuente que originó los sedimentos que formaron estas rocas, ya que el Ce es un elemento relativamente inmóvil y comúnmente está más concentrado en rocas de composición félsica. Este punto será respaldado más adelante con la presentación de los gráficos de dispersión y las relaciones interelementales establecidas.

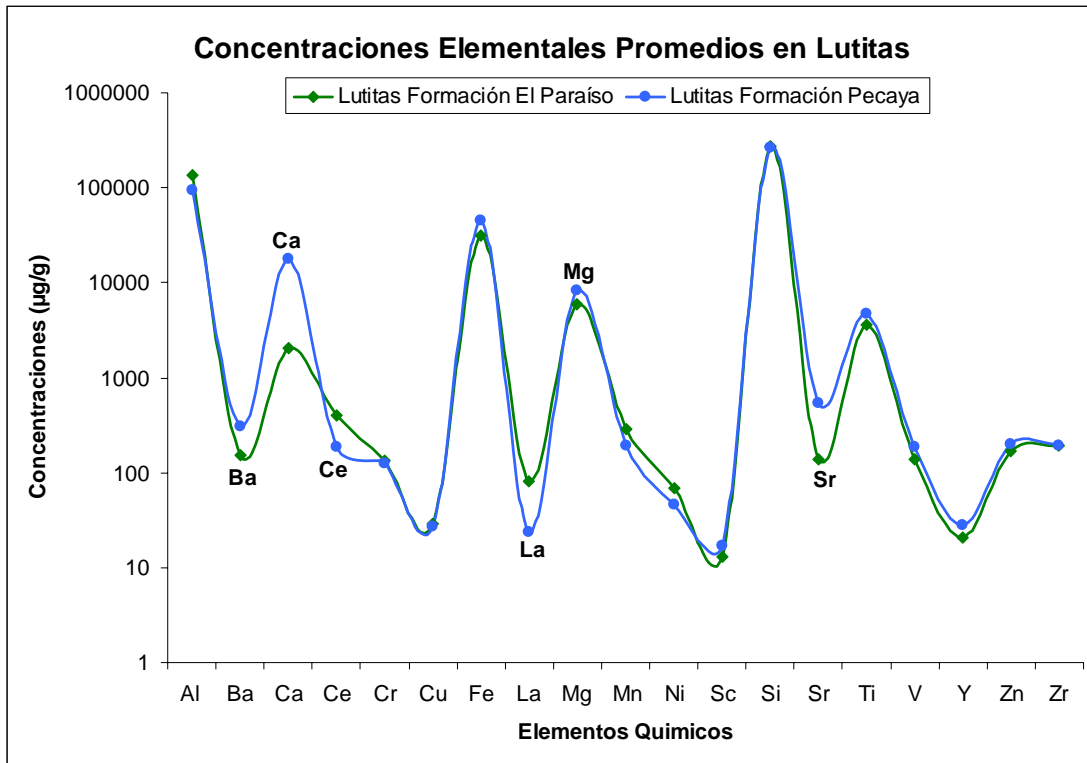
Finalmente, los resultados apreciados en ambas figuras (20 y 21) soportan fielmente el comportamiento similar de las concentraciones elementales de las lutitas de la Formación El Paraíso con los valores reportados por Turekian y Wedepohl (1961), y los valores de las lutitas australianas Post Arqueano [PAAS - Post Archean Australian Shales] (Cullers, 2002), respectivamente.

### **Lutitas de la Formación El Paraíso vs. Lutitas de la Formación Pecaya**

Luego de establecer la comparación entre las concentraciones promedio de los elementos químicos determinados en las lutitas de la Formación El Paraíso (quebrada Purureche) con la composición de las lutitas promedio mundial; es conveniente evaluar como varían las concentraciones de las lutitas promedio de la Formación El Paraíso (Oligoceno Temprano a Medio) con respecto a las lutitas suprayacentes de la Formación Pecaya (Oligoceno Medio a Mioceno Temprano), para determinar si existe o no algún cambio significativo en el ambiente de depositación.

Las formaciones El Paraíso y Pecaya se encuentran siempre en contacto concordante y transicional, dentro de la estratigrafía de la cuenca de Falcón. Por eso resulta interesante, comparar ambas formaciones para predecir como fueron los cambios a nivel de cuenca, bien sea en cuanto al aporte de los sedimentos, composición, condiciones redox, entre otras variables. Es posible establecer esta comparación debido a que el comportamiento químico de los elementos responde en función a esos cambios del ambiente sedimentario, y por consiguiente, pueden ser utilizados como marcadores de condiciones sedimentarias.

Para ello, se graficó, de igual forma, las concentraciones promedio de los elementos químicos medidos en las lutitas de la Formación El Paraíso con respecto a los valores reportados por Méndez (2006) para la Formación Pecaya [anexo 6 – figura 22].



**Figura 22:** Comparación de las concentraciones promedio para las lutitas de la Formación El Paraíso y las lutitas de la Formación Pecaya. Méndez (2006).

Los patrones de distribución para ambos tipos de rocas se solapan indicando similitud en el comportamiento químico (figura 22). Por lo tanto, puede establecerse que las lutitas de la Formación El Paraíso, son composicionalmente equivalentes a las lutitas de la Formación Pecaya reportada por Méndez (2006). Sin embargo, puede apreciarse un enriquecimiento relativo para los elementos: Ba, Ca, Mg, y Sr; en la Formación Pecaya con respecto a las lutitas de la Formación El Paraíso, mientras que esta última, presenta un enriquecimiento relativo de Ce y La en comparación con la lutita promedio de la Formación Pecaya.

Este resultado concuerda con la descripción litológica de la Formación Pecaya, la cual consiste esencialmente de lutitas gris oscuro, generalmente fisiles y limolíticas, localmente calcáreas, con ocasionales interstratificaciones de areniscas y calizas bioclásticas, en capas delgadas. Estas intercalaciones se han citado principalmente en

la región norte, cerca de la sierra de San Luis, donde también aparecen grandes concreciones irregulares de material calcáreo, de color ocre amarillento, de hasta más de 2 m de diámetro (Díaz de Gamero, 1977).

De acuerdo a lo observado, el mayor cambio que hay entre la sedimentación de la Formación El Paraíso con respecto a la Formación Pecaya, es la presencia de material calcáreo y por consiguiente un aumento de profundidad de la cuenca para permitir la depositación de carbonatos, indicando que la Formación Pecaya se depositó en un ambiente marino profundo. Por su parte, la Formación El Paraíso está relacionada más a condiciones continentales, litorales e incluso fluviales, donde no es posible la formación y preservación de carbonatos. En efecto, Díaz de Gamero (1977) establece que la mayor parte de la Formación El Paraíso es de tipo regresivo, donde la costa avanzó desde el suroeste hacia el norte y noreste. Los sedimentos fueron transportados por varios ríos, que progresivamente construyeron una amplia llanura deltáica. Los carbonos marcan el límite oriental de dicha llanura, unos kilómetros al este del actual río Paraíso.

Otra observación importante es la siguiente: los elementos que serán utilizados más adelante para determinar proveniencia sedimentaria (Cr, Ni, Y y V), prácticamente se solapan entre ambos patrones de distribución para cada tipo de roca, sugiriendo que posiblemente, entre estas dos formaciones no existe cambio aparente en la fuente de los sedimentos. En otras palabras, se esperaría que la composición de los sedimentos que dieron origen a la Formación El Paraíso sea similar a lo reportado por Méndez (2006), donde la misma indica una fuente de composición félsico – metamórfica como protolito de la Formación Pecaya.

### **Movilidad e inmovilidad de los elementos químicos**

La movilidad o inmovilidad de los elementos químicos en las rocas sedimentarias esta influenciada por la composición de la roca fuente, el grado de alteración química

(meteorización), las tasas de transporte y sedimentación, así como la intensidad de la diagénesis, entre otros factores.

Los gráficos de dispersión propuestos por Fralick y Kronberg (1997) y utilizados ampliamente por varios autores, consisten en graficar la concentración de cualquier elemento en función de la concentración de un elemento considerado como inmóvil. La concentración del aluminio (Al) es frecuentemente utilizada como atributo químico inmóvil, sin embargo es posible utilizar la concentración en porcentaje del óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) o la concentración del titanio (Ti), entre otros.

Por lo tanto, Fralick y Kronberg (1997) proponen que si existe una tendencia lineal positiva entre las variables graficadas contra el Al, los elementos tienden entonces a un comportamiento de inmovilidad. Cabe destacar, que los elementos inmóviles son buenos indicadores de proveniencia sedimentaria. De esta forma, las relaciones lineales con pendientes positivas, indican que los elementos se encuentran en la misma fase mineral, mientras que las relaciones lineales con pendientes negativas sugieren que los elementos están asociados a fases minerales distintas.

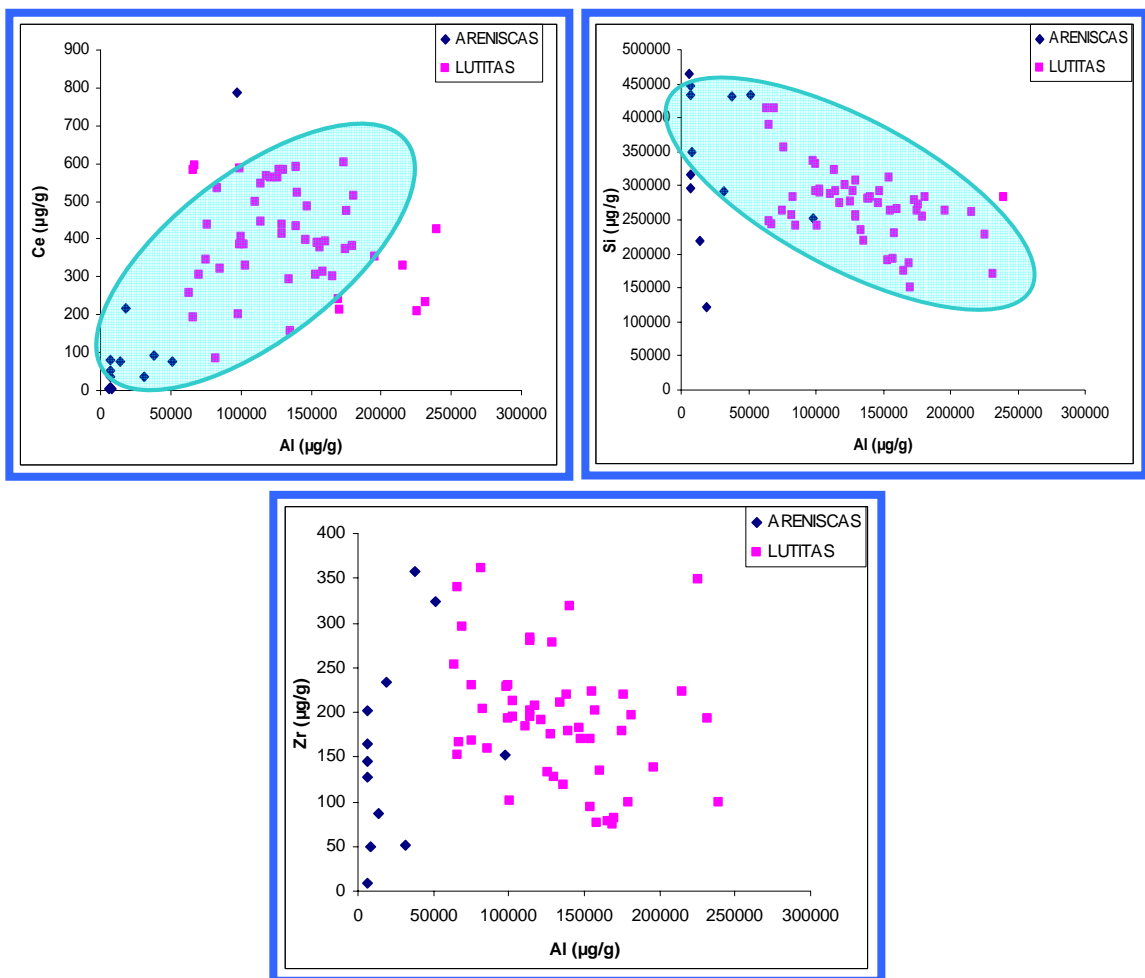
Cuando se trabaja con datos geoquímicos derivados de litologías heterogéneas (lutitas y areniscas), como es el caso de las muestras analizadas, es muy difícil encontrar una correlación lineal perfecta. Por consiguiente, en los gráficos de dispersión obtenidos, sólo puede considerarse que existe cierto comportamiento lineal entre ambas variables, pero indudablemente esta relación lineal relativa se ve influenciada por la dispersión existente de los datos.

De acuerdo a esta premisa, puede establecerse que los elementos que presentaron cierta correlación lineal positiva con respecto al aluminio fueron: Ce, Cr, Cu, La, Ni, Pb, Sr, V y Y. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, la dispersión de los datos es bastante considerable, dado a las diferentes litologías que fueron analizadas en la Formación El Paraíso, las cuales indudablemente pueden sugerir posibles



modificaciones en el fraccionamiento hidrodinámico de los minerales que contienen dichos elementos. La figura 23 muestra tres ejemplos de los gráficos de dispersión obtenidos en este estudio. Esta figura muestra específicamente el comportamiento de los elementos Ce, Si y Zr con respecto al Al. El resto de los gráficos de dispersión construidos pueden apreciarse en los anexos 7 - 11.

El comportamiento lineal con pendiente positiva para los elementos Ce, Cr, Cu, La, Ni, Pb, Sr, V y Y con respecto al aluminio, indican que tales elementos con comportamiento inmóvil pueden estar asociados a la fase arcillosa. Por consiguiente, puede establecerse que tales elementos tienen mayor afinidad con las rocas de grano fino (lutitas).



**Figura 23:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Ce, Si y Zr con respecto al Al.

Por otro lado, pudo apreciarse en los gráficos de dispersión, que el resto de los atributos químicos analizados presentaron una ausencia de correlación con respecto al aluminio. Tales elementos son: Ba, C, Ca, Fe, Mg, Mn, S, Sc, Ti, Zn y Zr. En la figura 23 puede observarse la ausencia de correlación para el Zr.

En otras palabras, los elementos que presentan comportamiento no lineal, tienen carácter móvil, por lo tanto, los mismos pueden estar siendo removidos bien sea por procesos de meteorización o por procesos diagenéticos. En cualquiera de los dos casos, la mayoría de estos elementos móviles presentan esta tendencia dado a que los mismos, posiblemente tienen potenciales de ionización que les permiten disolverse en solución y de esta forma ser removidos, si es el caso de alteración química; ahora si es el caso de diagénesis fácilmente algunos de estos elementos pueden pasar a formar nuevos minerales antigénicos así como precipitar y dar paso a la formación de carbonatos (cementos) y/o sulfatos, dependiendo de la disponibilidad de los elementos químicos y las condiciones del medio de depositación .

Finalmente el comportamiento lineal inverso o negativo que mostró el Si con respecto al Al (figura 23) indica el fraccionamiento hidráulico del sistema, es decir, se puede interpretar una tendencia de valores altos de Si para aquellas fracciones de tamaño de grano grueso con respecto a las fracciones más finas, la cuales, a su vez se muestran enriquecidas en Al.

Como conclusión puede establecerse que los elementos con cierto carácter de inmovilidad dado a su comportamiento con respecto al aluminio son: Al, Ce, Cr, Cu, La, Ni, Pb, Si, Sr, V y Y. Mientras que el resto de los atributos químicos analizados pueden considerarse como elementos móviles: Ba, C, Ca, Fe, Mg, Mn, S, Sc, Ti, Zn y Zr.

### **Otras relaciones de interés geoquímico**

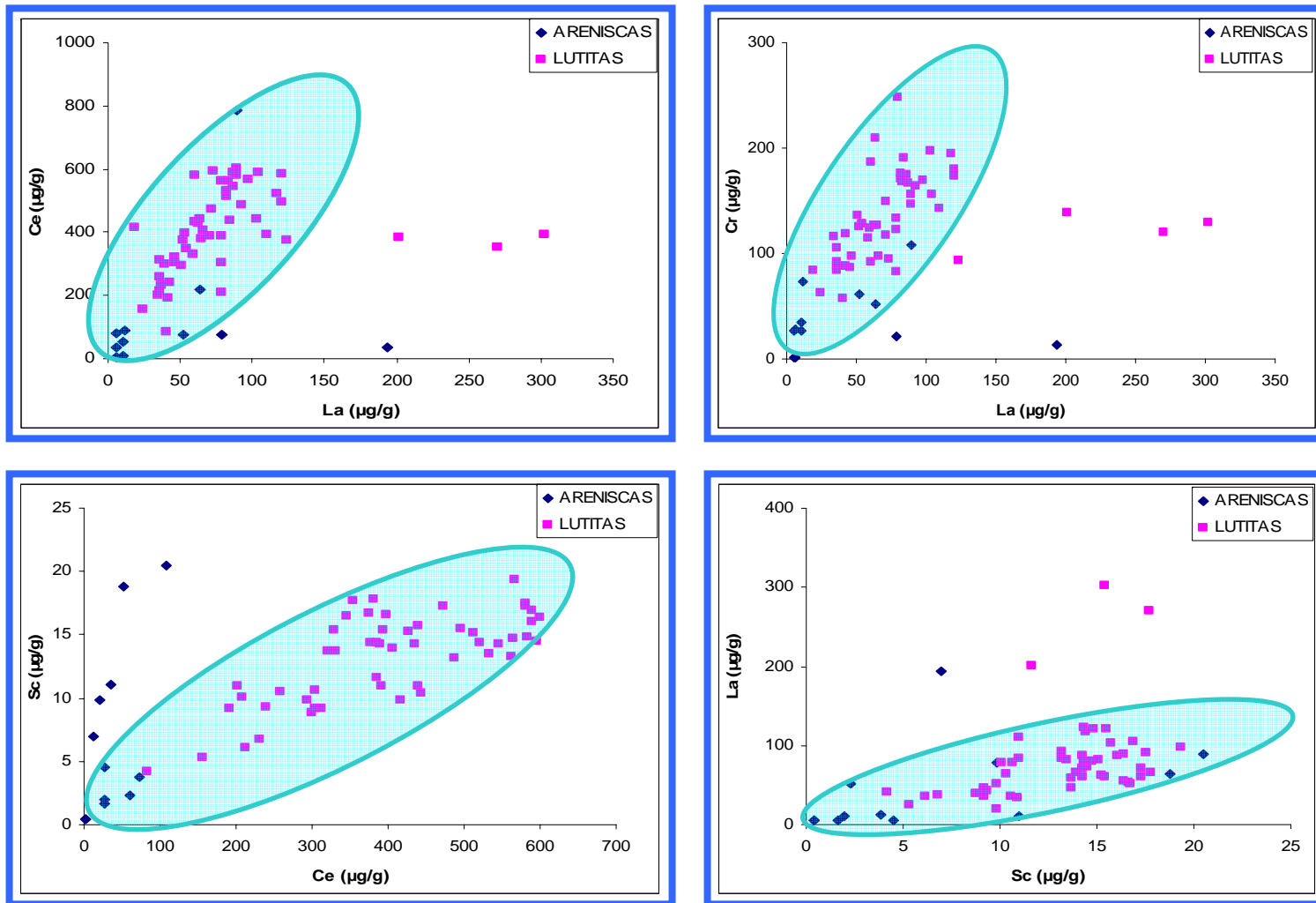
Adicionalmente a los gráficos de dispersión mostrados en función del aluminio, pueden construirse otros gráficos de dispersión de pares de elementos, los cuales suministran información relevante para discriminar posibles asociaciones geoquímicas.

De tal forma, se construyeron los diagramas Ce/La, Cr/La, Sc/Ce y La/Sc propuestos por autores como Piovano et al. (1999), Cullers (2000), entre otros. Estos gráficos mostraron una correlación lineal entre los pares de atributos químicos evaluados, indicando que probablemente estos elementos se encuentren asociados a la fracción de grano limo – arcilla, definiendo una posible asociación geoquímica clástica – arcillosa, la cual fue verificada más adelante con las herramientas de estadística multivariada utilizadas (figura 24).

### **Proveniencia sedimentaria**

Los diagramas de dispersión y/o las relaciones interelementales representan herramientas muy útiles para hacer análisis de geoquímica sedimentaria. En este sentido, para discriminar la posible fuente de los sedimentos que dieron origen a la Formación El Paraíso, se emplearon diagramas de dispersión postulados por otros autores.

El principio básico de estos diagramas, es que los mismos, deben construirse con aquellos elementos que presenten relativa inmovilidad ante los procesos de meteorización, transporte y diagénesis dentro de los ambientes sedimentarios. Por tal motivo, los diagramas que serán mostrados a continuación utilizaron los elementos Cr, Ni, Y y V, como indicadores de proveniencia, dada la correlación lineal que presentaron con respecto al aluminio, lo que les da el carácter de inmovilidad.



**Figura 24:** Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ce, Cr, La y Sc

Para discriminar la fuente de los sedimentos entre las litologías de composición máfica, sedimentaria (intermedia) y félsica, se utilizó el diagrama de dispersión de pares de elementos Ni vs. Cr (Noya, 2000; citado por Méndez, 2006). Los elementos Ni y Cr se encuentran en concentraciones altas para las rocas máficas y ultramáficas, mientras que valores más bajos de estos elementos delimitan el campo félsico – intermedio.

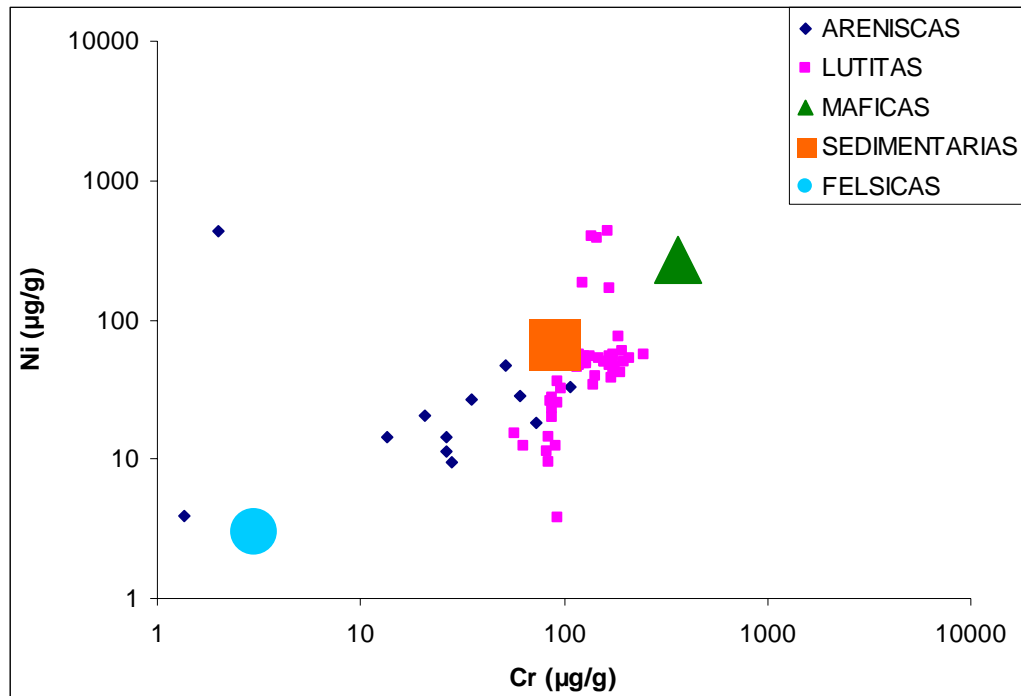
La figura 25 muestra el diagrama de dispersión Ni vs. Cr construido para representar las muestras de la Formación El Paraíso. Se tomaron las concentraciones promedio de estos elementos para cada tipo de roca (máfica, sedimentaria y félsica) con la finalidad de establecer los campos litológicos demarcados en la figura.

Por consiguiente, para definir el campo máfico se tomó los valores reportados de Cr (360  $\mu\text{g/g}$ ) y Ni (267 $\mu\text{g/g}$ ) de un basalto geoestándar (BE-N). Mientras que para el campo litológico sedimentario intermedio se tomó los valores de Cr (90  $\mu\text{g/g}$ ) y Ni (68  $\mu\text{g/g}$ ) de la lutita promedio mundial reportada por Turekian y Wedepohl (1961). Finalmente, para el campo félsico se consideraron los valores de Cr (3  $\mu\text{g/g}$ ) y Ni (3  $\mu\text{g/g}$ ) de un granito geoestándar (MA-N). Cabe destacar que se utiliza escala logarítmica en estos tipos de gráficos para visualizar mejor los campos litológicos establecidos.

En la figura 25, las muestras de areniscas correspondientes a la Formación El Paraíso se distribuyen entre los campos de composición sedimentaria (intermedia) y félsica; mientras que las lutitas tienden a distribuirse de igual forma hacia el campo de composición intermedia pero acercándose más al campo máfico. Esta última observación, puede atribuirse a un posible aporte de la fuente de minerales micáceos ferromagnesianos como biotitas.

Sin embargo, a manera general, puede considerarse que la mayoría de las muestras de la Formación El Paraíso se encuentran distribuidas o ubicadas entre los campos de

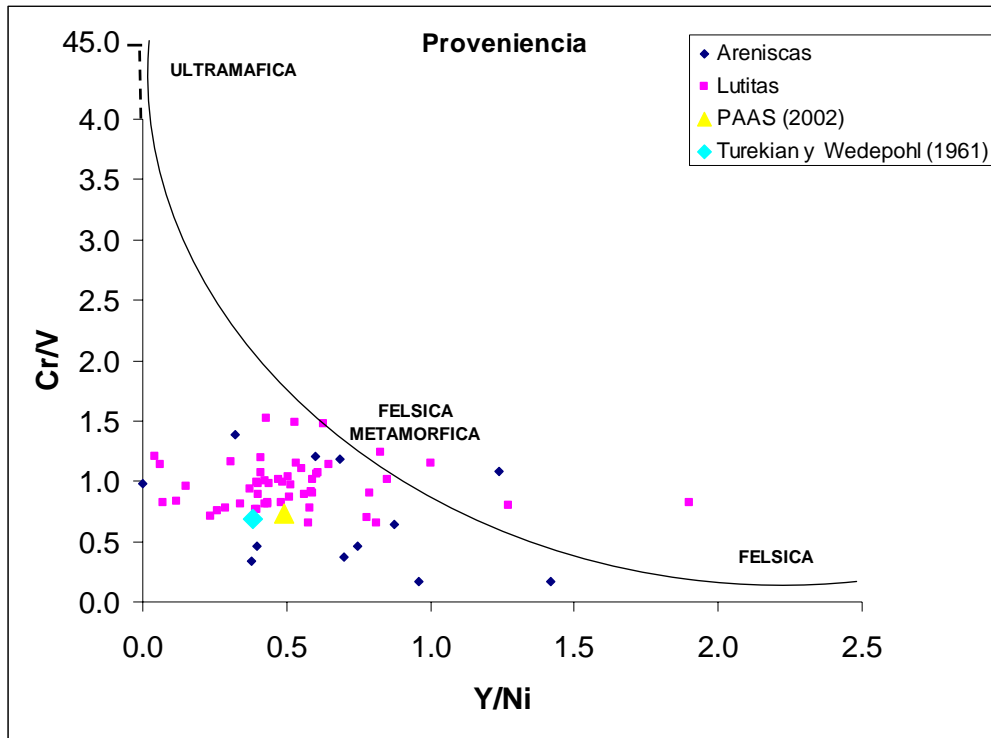
composición sedimentaria (intermedia) – félsica, lo que indica una posible fuente constituida por rocas ígneas félsicas como granitos, granodioritas, dioritas y/o rocas sedimentarias previamente depositadas durante el Cretáceo – Paleógeno.



**Figura 25:** *Relación interelemental Ni vs. Cr, para discriminar proveniencia sedimentaria*

Ahora bien, el diagrama de Ni vs. Cr analizado, sólo considera los campos definidos por las rocas ígneas y sedimentarias. Por lo tanto, para establecer una evaluación más completa de la proveniencia sedimentaria de la Formación El Paraíso, es conveniente utilizar un diagrama que contemple el campo de las rocas metamórficas.

El diagrama Cr/V vs. Y/Ni (figura 26) representa una herramienta diagnóstica para discriminar fuente entre las rocas ígneas y metamórficas. Valores bajos de la relación Y/Ni conjunto con altos valores de la relación Cr/V indican fuente ultramáfica, mientras que el caso contrario delimita el campo de las rocas con composición félsica. Para establecer los campos litológicos mostrados en este diagrama se utilizaron las relaciones reportadas por Dinelli et al. (1999).



**Figura 26:** Diagrama Cr/V vs. Y/Ni para discriminar proveniencia sedimentaria

Las relaciones Cr/V vs. Y/Ni permiten establecer que las muestras de la Formación El Paraíso se encuentran distribuidas dentro del campo de composición félsica – metamórfica (figura 26). Adicionalmente, los valores de estas relaciones, para las lutitas promedio mundial reportadas por Turekian y Wedepohl (1961), y PAAS (2002) reflejan también su origen félsico – metamórfico.

Es necesario destacar que los dos diagramas anteriormente comúnmente utilizados para discriminar proveniencia sedimentaria, presentan dos limitaciones al establecer con exactitud los campos litológicos correspondientes a las rocas sedimentarias y metamórficas, dado a que es difícil establecer en sí una huella geoquímica diagnóstica para ambas litologías.

El diagrama mostrado en la figura 25, presenta una limitación para precisar específicamente, si la fuente de sedimentos proviene de otras rocas sedimentarias

preexistentes. A manera general, no puede considerarse que las rocas sedimentarias previamente depositadas tengan una huella geoquímica definida, ya que las mismas heredan la composición de la fuente original que las formó. De igual forma, en la figura 26 existe un campo definido para las rocas metamórficas. Esta delimitación litológica debe considerar que el metamorfismo representa una suma de procesos esencialmente isoquímicos, por lo tanto, este proceso sólo ocasiona en principio, cambios mineralógicos y texturales, más no químicos. En otras palabras, las rocas metamórficas tampoco tienen una huella geoquímica propia, sino que adquieren la del protolito que las generó.

En conclusión, a pesar de las limitaciones que presentan los diagramas de dispersión y las relaciones interelementales evaluadas, puede proponerse que la composición de los sedimentos que dieron origen a la Formación El Paraíso, caen dentro de un campo félsico – metamórfico – intermedio. Esto significa que la proveniencia sedimentaria para esta formación pudiese estar constituida por granitos, gneises graníticos, esquistos micáceos, esquistos cuarzosos, filitas, entre otras litologías de composición similar, así como probablemente rocas sedimentarias preexistentes. Por consiguiente, la interpretación global de los resultados permite proponer, que la fuente que pudo haber aportado los sedimentos que conforman esa sección de la Formación El Paraíso, fue una fuente tipo Cordillera de La Costa y rocas sedimentarias previamente depositadas (Cretáceo-Paleógeno).

En este sentido, la Cordillera de la Costa está constituida principalmente por rocas metamórficas originadas en el Cretáceo, escasas rocas sedimentarias y algunas rocas ígneas máficas y félsicas. A su vez, la Cordillera del Litoral estratigráficamente comienza con un conglomerado basal que descansa sobre un augeo–gneis granítico, donde yacen una serie de esquistos calcáreos, grafitosos, micáceos y calizas; mientras que la Serranía del Interior está conformada por sedimentos metamorfizados que incluyen conglomerados, areniscas, calizas y pizarras calcáreas. En estas series se conocen afloramiento de rocas ígneas félsicas.



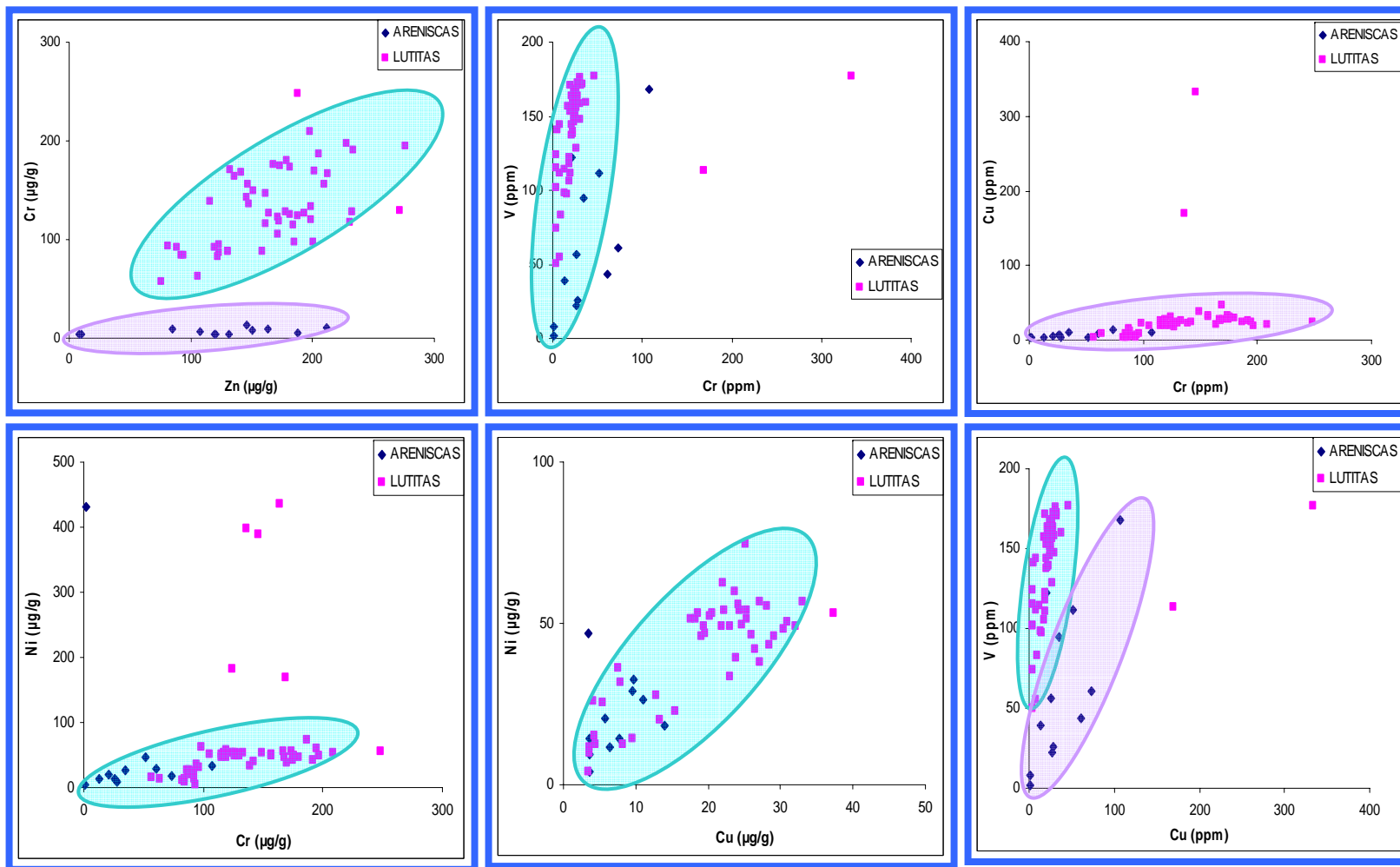
Toda esta breve descripción demuestra que una fuente tipo Cordillera de la Costa, podría perfectamente ser la fuente que generó los sedimentos de la Formación El Paraíso. Por último, es conveniente indicar que la fuente de sedimentos obtenida no puede asociarse con rocas que hoy en día están aflorando al sur de la cuenca de Falcón, y tampoco puede descartarse la idea de que posiblemente la fuente que originó a los sedimentos de la Formación El Paraíso ya no esté presente.

### **Condiciones óxido - reductoras**

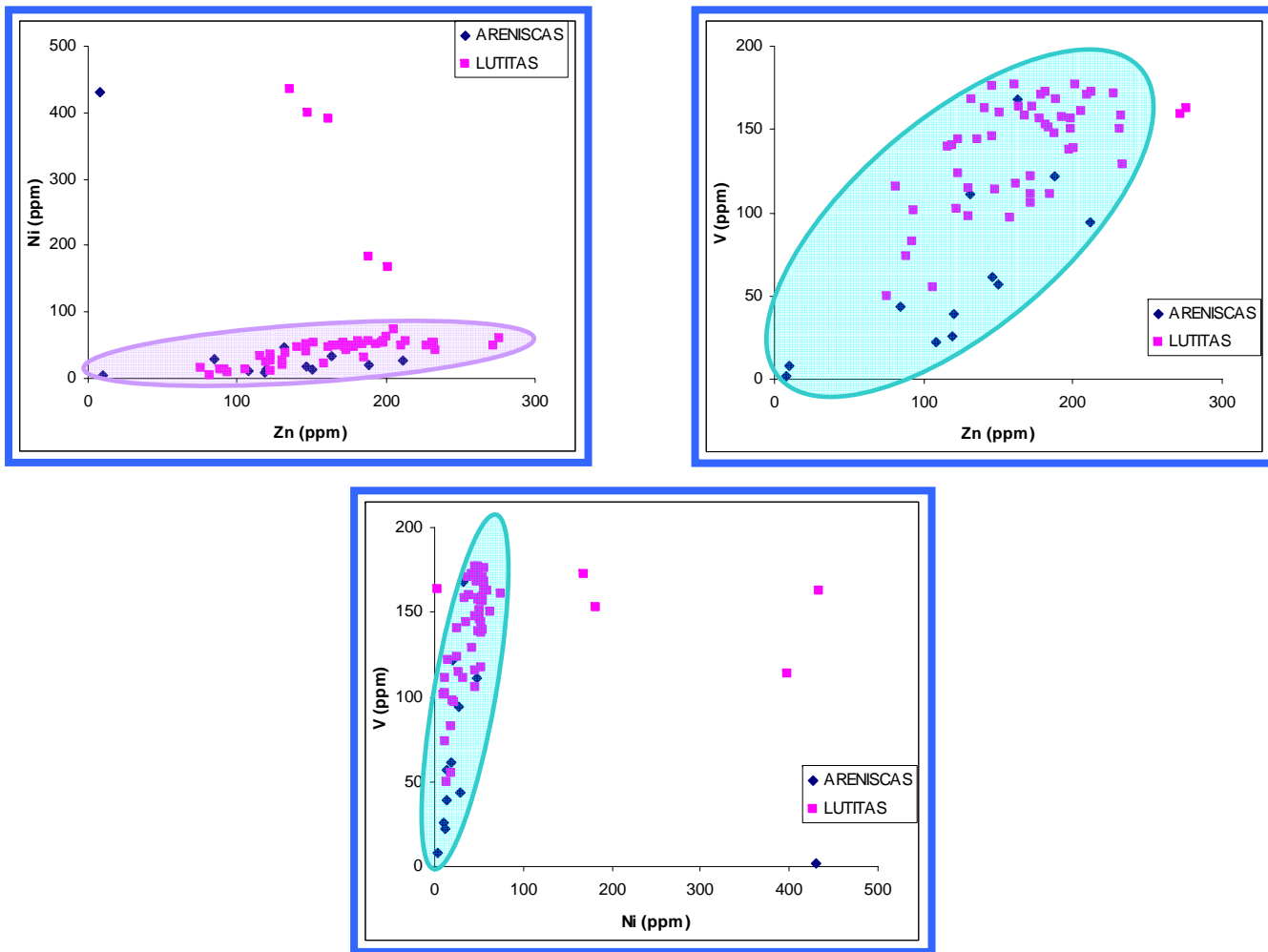
Los elementos trazas frecuentemente utilizados como indicadores de cambios redox en las rocas sedimentarias son: Mo, V, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, Mn, entre otros. La forma más sencilla para determinar la sensibilidad de estos elementos a cambios redox es la correlación de ellos con el contenido de carbono orgánico total (COT) (Montilla, 2006).

Debido al bajo porcentaje de carbono total determinado en las muestras, fue prácticamente descartado discriminar el contenido de carbono orgánico total, dado que las muestras no evidencian preservación relevante de materia orgánica, indicando a manera general, que las condiciones imperantes al momento de la depositación de los sedimentos que dieron origen a la Formación El Paraíso fueron totalmente oxidantes.

Se logró resultados interesantes estableciendo correlaciones entre los elementos Ni, Cu, Cr, V y Zn (figura 27), donde puede apreciarse que las mejores correlaciones entre estos elementos se alcanzan en las lutitas con respecto a las areniscas, infiriéndose que esta respuesta posiblemente no se deba a condiciones óxido-reductoras del medio, sino más bien a posibles asociaciones con el material arcilloso, así como el contenido minoritario de algunos sulfuros o sulfatos post-diagenéticos, que no me están suministrando información relevante de las condiciones redox para el inicio de la sedimentación del Oligoceno.



**Figura 27:** Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ni, Cu, Cr, V y Zn



**Figura 27:** Continucción. Diagramas de dispersión de pares de elementos. Correlaciones entre Ni, Cu, Cr, V y Zn

Indicadores químicos tales como: Ni/Co, V/Cr y V/(V+Ni) han sido utilizados en varios estudios para evaluar condiciones paleoredox. Jones y Manning (1994) sugieren que valores de la relación V/Cr en lutitas menores a 2 ( $V/Cr < 2$ ) pueden inferirse condiciones oxidantes, valores entre 2 y 4,25 ( $V/Cr = 2 - 4,25$ ) sugieren condiciones disóxicas, mientras que valores mayores a 4,25 están relacionados a condiciones subóxicas a anóxicas. De acuerdo a esto, la tabla 3 muestra el valor mínimo, máximo y el promedio obtenido para esta relación en las lutitas de la Formación El Paraíso.

**Tabla 3:** *Relación V/Cr para evaluar condiciones redox.*

| <b>Lutitas de la Formación El Paraíso</b> |               |               |                 |                          |
|---|---------------|---------------|-----------------|--------------------------|
| <b>Variable</b>                           | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Promedio</b> | <b>Condiciones redox</b> |
| V/Cr                                      | 0,66          | 1,53          | 1,08            | Oxidantes                |

Como puede apreciarse en la tabla anterior, de acuerdo a la relación V/Cr puede interpretarse que las posibles condiciones redox imperantes para el momento de la depositación de la Formación El Paraíso fueron totalmente oxidantes. Este simple análisis corrobora lo dicho anteriormente con respecto a las posibles condiciones óxido – reductoras del ambiente de depositación.

### **Análisis de estadística descriptiva y multivariada**

Para estudiar la distribución de los datos de una población con la finalidad de precisar la tendencia o el comportamiento de los mismos hacia valores altos, intermedios o bajos, es necesario aplicar en primera instancia un análisis de estadística descriptiva. Cuando se realiza un tratamiento estadístico descriptivo a la población obtenida (64 muestras y 22 variables), es fundamental tener en cuenta ciertas consideraciones previas:

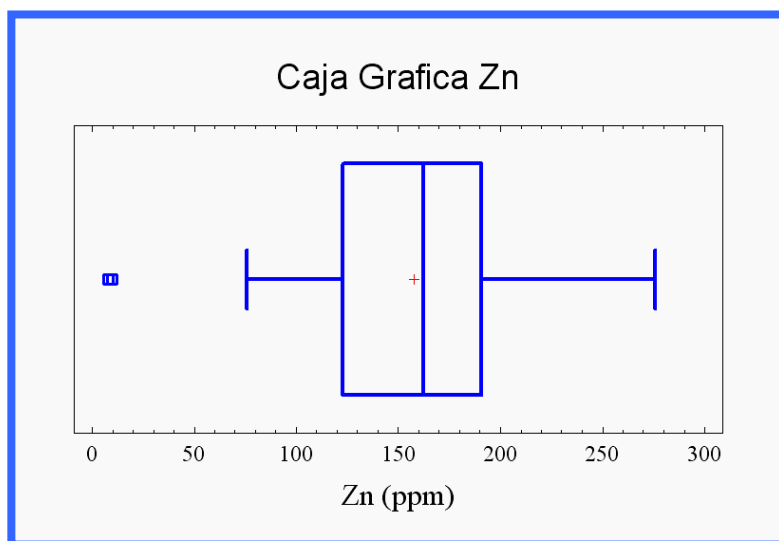
a. Los datos originales obtenidos de los análisis químicos, fueron colocados en orden estratigráfico, así como todas las variables químicas fueron expresadas en la misma unidad ( $\mu\text{g/g}$ )

b. Para los elementos que presentaron valores de concentración por debajo del límite de determinación en algunas muestras, fue necesario reemplazarlos por la mitad de ese límite de determinación. La finalidad de este procedimiento es evitar colocar valores negativos o ceros, en aquellas muestras donde algunos elementos no fueron detectados. Sin embargo, en la matriz de datos de las muestras de la Formación El Paraíso, ningún elemento presentó más del 25 % de valores de concentración por debajo del límite de determinación, lo que permitió trabajar con las 22 variables químicas determinadas, sin tener que eliminar a ninguna de ellas.

Por consiguiente, el análisis exploratorio de los datos se llevó a cabo utilizando toda la información de las 22 variables en las 64 muestras. Este análisis exploratorio consistió en elaborar cajas gráficas e histogramas de frecuencia mediante el programa estadístico STATGRAPHICS Plus versión 5.1, con la finalidad de precisar la distribución de los datos y examinar la presencia de datos anómalos.

La mayoría de los elementos químicos (14 en total) presentaron valores anómalos: C, Ca, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, Si, Ti, V, Y, Zn y Zr. La figura 28 muestra la caja gráfica para la variable Zn y el resto de las cajas gráficas obtenidas para todas las variables pueden apreciarse en los anexos 12 – 15.

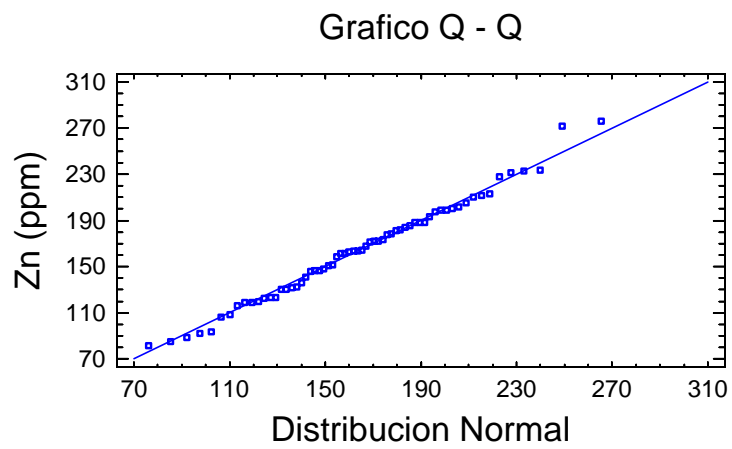
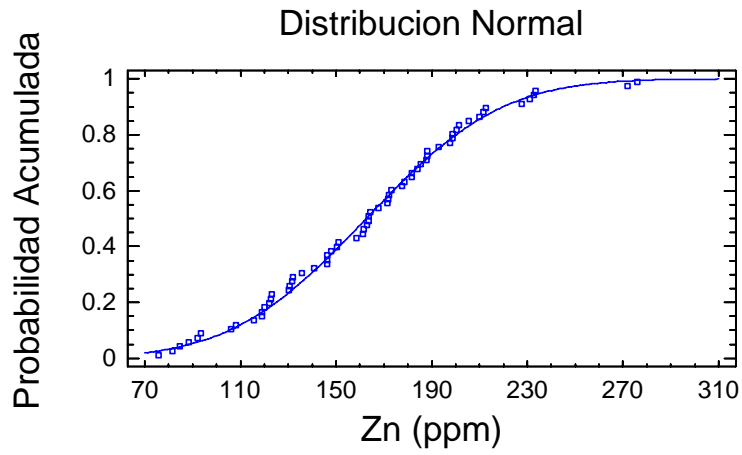
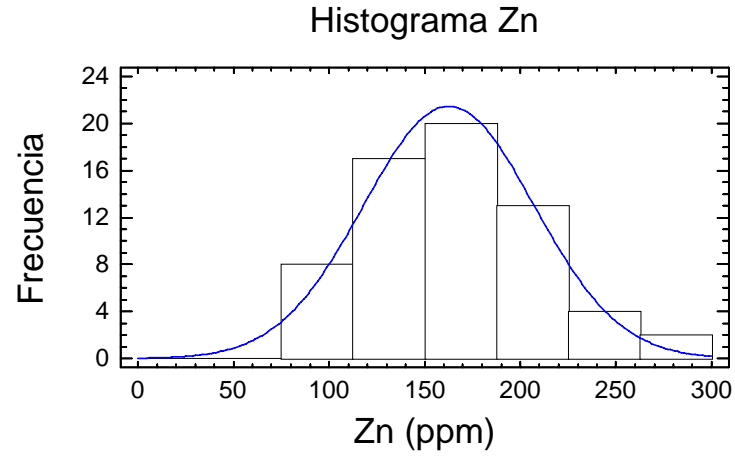
Con estos resultados, fue necesario sustituir los valores anómalos obtenidos para cada variable por el valor de la mediana de los datos depurados (mediana calculada sin los datos anómalos). Este procedimiento es fundamental para aplicar los análisis de estadística multivariada y así evitar que la presencia de los datos anómalos interfiera en los resultados.



**Figura 28:** *Caja Grafica para la variable Zn*

El uso de los histogramas de frecuencia para los datos originales permitieron precisar que los elementos Al, Ce, Cr, Pb, Si, Y, Zn y Zr mostraron una distribución normal, mientras que los elementos C, Ca, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, S y Ti presentaron una distribución asimétrica tipo “J” invertida. Los elementos restantes Ba, Sc, Sr y V reflejaron distribuciones bimodales. Los histogramas de frecuencia para cada una de estas variables pueden apreciarse en los anexos 16 – 21.

Para la aplicación de métodos de estadística multivariada, es necesario que la mayoría de los atributos químicos presenten distribución normal. Por consiguiente, aparte de reemplazar los valores anómalos por el valor de la mediana, como se nombró anteriormente, fue fundamental aplicar a esta nueva matriz de datos depurados, pruebas estadísticas más robustas que permitieran definir cuales variables tienen distribución normal. Estas pruebas fueron análisis de curvas de probabilidad, gráficos Q – Q y la prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov. La figura 29 muestra el histograma de frecuencia, la curva de probabilidad y el grafico Q – Q para la variable Zn, construidos con los datos depurados.



**Figura 29:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico  $Q - Q$  para la variable Zn. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana

El histograma de frecuencia, la curva de probabilidad y el gráfico Q – Q para la variable Zn mostrados en la figura 29, reflejan como esta variable (Zn) presenta una distribución normal, debido a que casi todos los datos caen dentro del rango de variabilidad normal. Por lo tanto, al aplicar estos métodos para lograr la distribución normal de los datos, se encontró que las variables Ca, La, Mg y Ti adoptaron una distribución normal, aparte de los elementos Al, Ce, Cr, Pb, Si, Y, Zn y Zr; lográndose de esta forma que un total de 12 variables mostraran una distribución normal. Los histogramas de frecuencia, las curva de probabilidad y los gráficos Q – Q para el resto de las variables depuradas de los datos anómalos se presentan en los anexos 22 – 32.

Finalmente, para disminuir las diferencias de magnitudes entre los datos depurados fue necesario realizar la estandarización a Z (0,1) de acuerdo a la metodología propuesta por Montero et al. (2005). Este procedimiento consistió en obtener una distribución con una media igual a cero y una desviación estándar igual a 1. Para ello, se aplicó la siguiente fórmula:  $Z = (X - \bar{X})/\sigma$ , donde **Z** representa el valor estandarizado, **X** corresponde al valor inicial,  $\bar{X}$  representa la media aritmética y  $\sigma$  la desviación estándar. La estandarización evita problemas de orden de magnitud entre las variables, disminuyendo el efecto que puede causar una variable de alta concentración sobre el agrupamiento de las variables en función de su magnitud y no de su variabilidad.

A esta matriz de datos estandarizada se le aplicó de nuevo los análisis de curvas de probabilidad, los gráficos Q – Q y la prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov, encontrándose que las variables no cambiaron su distribución. Por lo tanto, para el análisis multivariado se utilizó una matriz de datos depurados y estandarizados con 64 muestras y 22 variables.

Con la matriz de datos estandarizados y el 55% de las variables con una distribución normal, se procedió a aplicar los análisis de estadística multivariada respectivos. Para

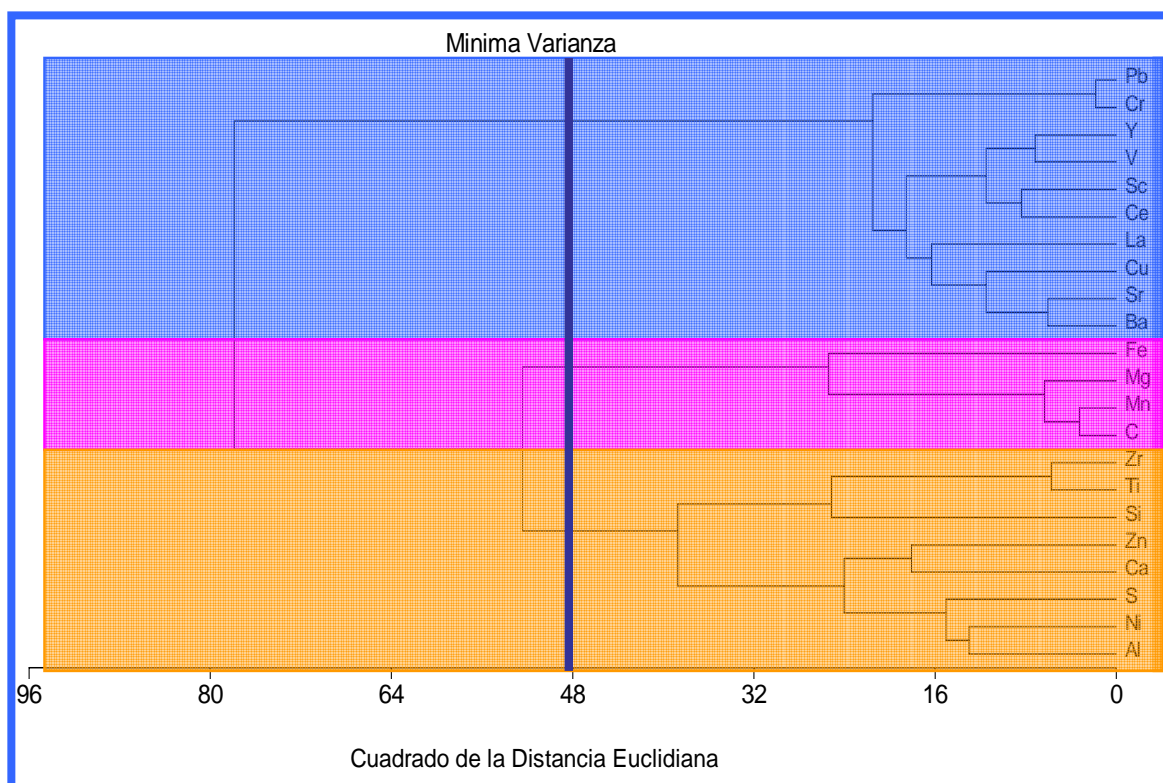


agrupar las variables en las posibles asociaciones geoquímicas distinguibles, se utilizó el análisis de agrupamiento (cluster) y el análisis de factores componentes principales, mientras que para definir la posibles quimiofacies existentes en base a las asociaciones geoquímicas establecidas por los dos métodos anteriores, se utilizó el análisis de agrupamiento restringido (cluster constrained).

## Determinación de posibles asociaciones geoquímicas

### Análisis de agrupamiento de variables

Los resultados de este análisis pueden apreciarse en el dendograma generado para las 64 muestras de la Formación El Paraíso (figura 30). Las variables agrupadas respondieron a la aplicación del método de mínima varianza y un corte del cuadrado de la distancia euclidiana en 48, como punto para representar la disimilitud entre las variables.



**Figura 30:** Dendrograma para el análisis de agrupamiento de variables con la matriz de datos depurados y estandarizados

El análisis de agrupamiento de variables mostrado en la figura anterior se llevó a cabo mediante el paquete estadístico “MVSP versión 3.1”. Este análisis permitió agrupar las variables en tres posibles asociaciones geoquímicas. Los elementos Pb, Cr, Y, V, Sc, Ce, La, Cu, Sr y Ba pueden estar asociados a la fracción clástica – arcillosa, fase en la cual podrían estar adsorbidos o formando parte de la estructura de estos minerales arcillosos. Para mejorar la definición de este grupo, se esperaba que el aluminio (Al) estuviese presente, dado a que este elemento mayoritario es característico de la fracción arcillosa.

Un segundo grupo de variables está conformado por los elementos Fe, Mg, Mn y C, los cuales sugieren una posible asociación de carbonatos. De igual forma, para afianzar la definición de este grupo, se esperaba que el calcio (Ca) estuviese presente, dado a que la concentración de este elemento en los carbonatos es predominante. Sin embargo, es posible que el mismo haya sido movilizado por alteración química y/o procesos diagenéticos.

Finalmente, el tercer grupo de variables está constituido por los elementos Zr, Ti, Si, Zn, Ca, S, Ni y Al. La unión de estas variables no tiene una explicación geoquímica claramente definida, es decir, muestra una asociación ambigua. La presencia de Ti, Si y Zr podría estar sugiriendo una asociación del tipo clástico – arenosa – resistatos, pero al presentar elementos como el Zn, S y Ni también podríamos estar hablando de una posible asociación de sulfuros. Por su parte, el aluminio representa un elemento incompatible dentro de este grupo, dado que no parece tener una afinidad definida con las posibles asociaciones mencionadas.

Debido a la incertidumbre mostrada en este último grupo, ya que el programa sólo puede estar respondiendo a un razonamiento estadístico y por consiguiente no está estableciendo una buena interpretación geológica y geoquímica, fue necesario llevar a cabo un análisis de factores con la finalidad de mejorar el agrupamiento de las variables.

### **Análisis de factores componentes principales**

Como se nombró anteriormente, el análisis de factores componentes principales se aplicó para corroborar las posibles asociaciones geoquímicas obtenidas con el análisis de agrupamiento. Para ello, se utilizó el paquete estadístico “STATGRAPHICS Plus versión 5.1”. Este análisis empleó de igual forma las 22 variables químicas estudiadas.

El objetivo de esta prueba estadística fue obtener el número más pequeño de factores, los cuales contengan la mayor variabilidad en los 22 atributos químicos evaluados. En este caso, seis (6) factores fueron seleccionados dado que al agruparlos, contienen el 71% de la variabilidad de los datos

A continuación se presentan los pesos estadísticos para cada una de las variables calculadas en los seis factores principales seleccionados (tabla 4). Los valores resaltados en negrita son aquellos que presentan el mayor peso estadístico por variable para cada factor.

Los resultados de este análisis son los siguientes: En el **factor 1** se encuentran agrupados los elementos Al, Ba, Ce, Cr, Cu, La, Pb, Sc, Sr, V e Y, permitiendo establecer una asociación a la que denominaremos *Clástica – Arcillosa*. Este primer resultado confirma y mejora una de las asociaciones definidas por el análisis de agrupamiento.

El **factor 2** está integrado por los elementos C, Mg y Mn indicando una posible asociación de *Carbonatos*. Este resultado mantiene la definición de este grupo obtenido en el análisis de agrupamiento, evidenciando que el calcio (Ca) puede estar siendo movilizado de esta asociación por alteración química o por procesos diagenéticos.

**Tabla 4:** Análisis de Factores Componentes Principales

| Factores               | Factor 1      | Factor 2      | Factor 3      | Factor 4      | Factor 5      | Factor 6      |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Varianza (%)           | 23            | 15            | 12            | 8             | 7             | 6             |
| Varianza Acumulada (%) | 23            | 38            | 50            | 58            | 65            | 71            |
| Al                     | <b>0.1991</b> | 0.1967        | 0.1272        | 0.0096        | -0.2078       | 0.1692        |
| Ba                     | <b>0.3687</b> | -0.0990       | -0.0711       | -0.0092       | -0.0834       | -0.0118       |
| C                      | -0.0993       | <b>0.4986</b> | -0.1675       | -0.0593       | 0.0730        | -0.0080       |
| Ca                     | -0.0631       | 0.0905        | 0.0578        | <b>0.4313</b> | -0.0201       | -0.0309       |
| Ce                     | <b>0.4787</b> | 0.0354        | 0.0300        | -0.0759       | 0.0021        | -0.0970       |
| Cr                     | <b>0.4410</b> | -0.0053       | 0.1577        | -0.0945       | <b>0.1912</b> | 0.0637        |
| Cu                     | <b>0.2618</b> | -0.0217       | -0.0928       | 0.0861        | 0.0451        | -0.0270       |
| Fe                     | 0.1337        | 0.2930        | 0.0021        | -0.3450       | <b>0.1481</b> | <b>0.3539</b> |
| La                     | <b>0.3683</b> | -0.0792       | 0.0965        | 0.0918        | 0.1293        | -0.1091       |
| Mg                     | -0.0532       | <b>0.5389</b> | -0.1803       | <b>0.1379</b> | 0.0916        | -0.0396       |
| Mn                     | -0.2035       | <b>0.4334</b> | -0.1857       | -0.0689       | 0.1023        | -0.0968       |
| Ni                     | 0.1667        | 0.0715        | 0.0464        | <b>0.2605</b> | -0.0664       | <b>0.1650</b> |
| Pb                     | <b>0.5230</b> | -0.0224       | 0.1153        | -0.1366       | 0.1393        | -0.0166       |
| S                      | 0.0379        | 0.0725        | 0.1370        | -0.0215       | -0.3772       | <b>0.2017</b> |
| Sc                     | <b>0.3613</b> | 0.2505        | -0.1075       | <b>0.1358</b> | -0.0694       | -0.1241       |
| Si                     | -0.1052       | -0.0319       | <b>0.4504</b> | <b>0.1764</b> | <b>0.3637</b> | 0.0376        |
| Sr                     | <b>0.3102</b> | -0.0310       | -0.0082       | -0.0680       | -0.1596       | -0.0572       |
| Ti                     | -0.0107       | 0.2985        | <b>0.4669</b> | 0.0496        | -0.1931       | -0.1109       |
| V                      | <b>0.4013</b> | 0.1063        | -0.1702       | <b>0.1029</b> | -0.0508       | 0.0173        |
| Y                      | <b>0.3927</b> | 0.0968        | -0.1060       | <b>0.1327</b> | 0.0502        | -0.0387       |
| Zn                     | 0.0242        | -0.0466       | -0.0814       | <b>0.3129</b> | 0.1021        | <b>0.3617</b> |
| Zr                     | -0.0450       | 0.2895        | <b>0.4984</b> | -0.0653       | -0.0163       | -0.0621       |

En el **factor 3**, los elementos que presentan un peso significativo son el Si, Ti y Zr. Estas variables conforman un grupo que clasificaremos como *Clástico – Arenoso*, de

acuerdo a la compatibilidad química que presentan estos elementos a la fracción arenosa y a la formación de minerales resistentes como el cuarzo y el zirconio. El **factor 4** está representado por los elementos Ca, Mg, Ni, Sc, Si, V, Y y Zn. Estos atributos químicos conforman una asociación geoquímica denominada *Diagenética*, debido a la variabilidad de elementos químicos agrupados. Una característica importante de esta asociación, es que el calcio aparece con mayor peso estadístico en este factor, confirmando la hipótesis señalada en el factor 2, donde se propuso que el Ca podía estar siendo removido por procesos diagenéticos y consecuentemente tiene que agruparse en esta asociación diagenética, ligada básicamente a procesos posteriores a la sedimentación.

Los elementos agrupados en el **factor 5** (Cr, Fe y Si) no presentan explicación geoquímica aparente, indicando que esta asociación sólo es generada por el programa estadístico sin tener relación establecida dentro del ambiente de depositación analizado. Y finalmente, el **factor 6** concentró a los elementos Fe, Ni, S y Zn, dentro de una asociación definida como *Sulfuros*, debido a la afinidad química de estos elementos a las fases minerales de sulfuros tales como pirita o jarosita; minerales generalmente post-diagenéticos muy comunes en la zona de la cuenca de Falcón.

En conclusión, a través del empleo de análisis de factores componentes principales se identificaron cinco posibles asociaciones geoquímicas: clástica – arcillosa, carbonatos, clástica – arenosa, sulfuros y diagenética (tabla 5).

**Tabla 5:** Asociaciones geoquímicas establecidas por el método estadístico multivariado análisis de factores componentes principales

|                 |                                     |
|-----------------|-------------------------------------|
| <b>Factor 1</b> | Clástica - Arcillosos               |
| <b>Factor 2</b> | Carbonatos                          |
| <b>Factor 3</b> | Clástica - Arenosa                  |
| <b>Factor 4</b> | Diagenética                         |
| <b>Factor 5</b> | Sin explicación geoquímica aparente |
| <b>Factor 6</b> | Sulfuros                            |

## **Quimioestratigrafía**

### **Análisis de agrupamiento restringido (Cluster Constrained)**

Se realizaron análisis de agrupamiento restringido aplicando el paquete estadístico “MVSP versión 3.1”. Por consiguiente, se llevó a cabo el agrupamiento de las muestras para cada asociación geoquímica descrita anteriormente, con la finalidad de establecer unidades quimioestratigráficas dentro de la Formación El Paraíso.

La construcción de los dendrogramas para el análisis de agrupamiento restringido, se realizó de igual forma, utilizando el método de mínima varianza y para representar las disimilitudes se empleó la escala del cuadrado de la distancia euclidiana. Por lo tanto, esta herramienta permitió el agrupamiento de las muestras manteniendo la posición estratigráfica de las mismas, estableciendo una comparación entre la muestra suprayacente e infrayacente ubicadas dentro de la columna estratigráfica.

Las unidades quimioestratigráficas o quimiofacies pueden, consecuentemente, ser delimitadas mediante los resultados arrojados al aplicar el análisis de “cluster constrained” o agrupamiento restringido. De la figura 31 a la 34 se muestran los dendrogramas generados del análisis de agrupamiento restringido para cada posible asociación definida, tomando un punto de corte del cuadrado de la distancia euclidiana variable dependiendo de cada caso.

Las quimiofacies que dividen la secuencia sedimentaria con base en los procesos que controlan los elementos asociados a la fracción clástica – arcillosa pueden apreciarse en la figura 31. La figura 32 presenta las unidades quimioestratigráficas definidas de acuerdo a los procesos que controlan el comportamiento de los elementos asociados a la fracción calcárea. Por su parte, la figura 33 muestra como no se obtiene ninguna quimiofacies asociada a la fracción clástica – arenosa y finalmente, los procesos que controlan la distribución de los elementos asociados a la fase de sulfuros, permiten establecer las unidades quimioestratigráficas presentadas en la figura 34.

# Factor 1: Clástico - Arcilloso

Agrupamiento Restringido (Cluster Constrained) Minima Varianza

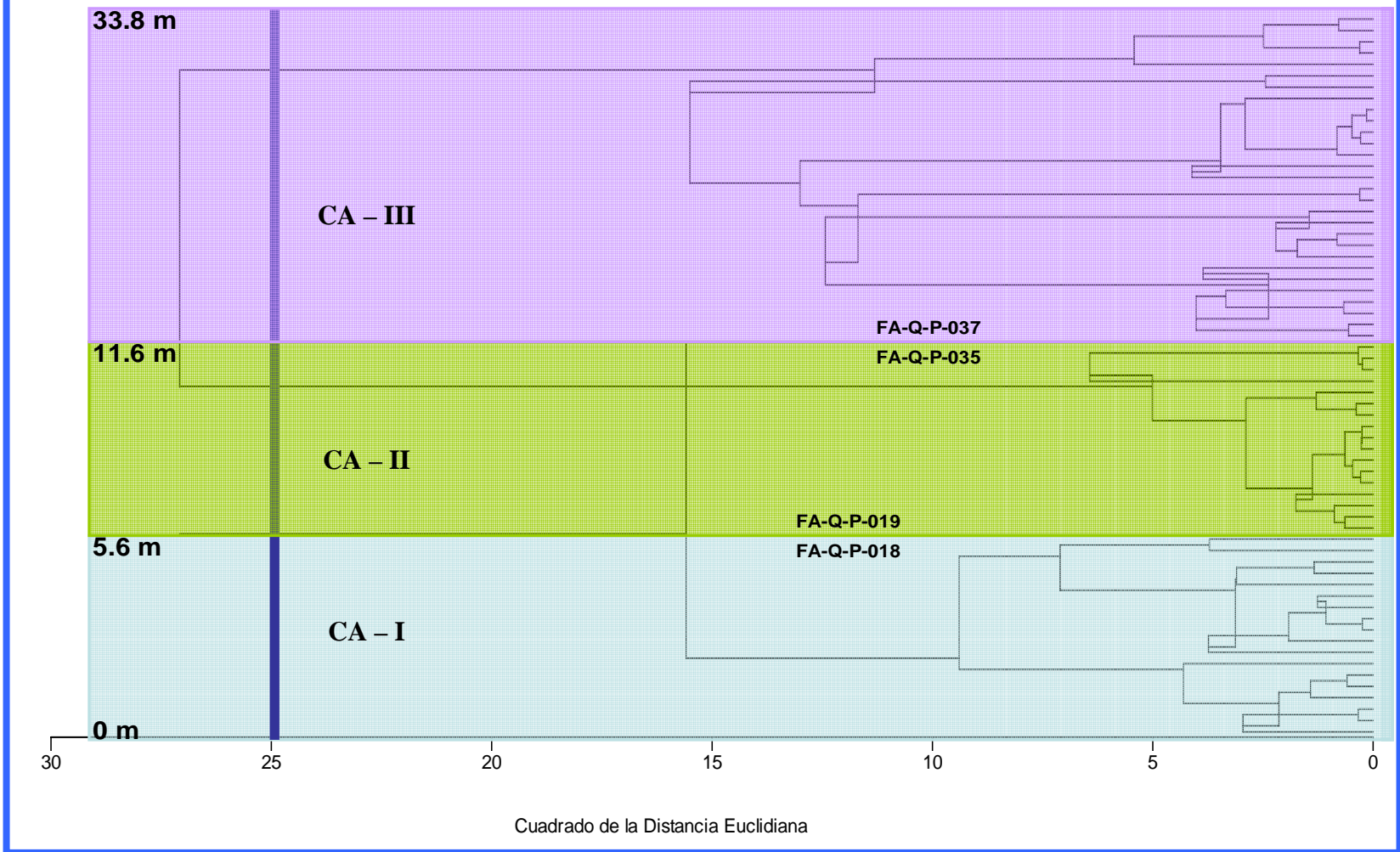
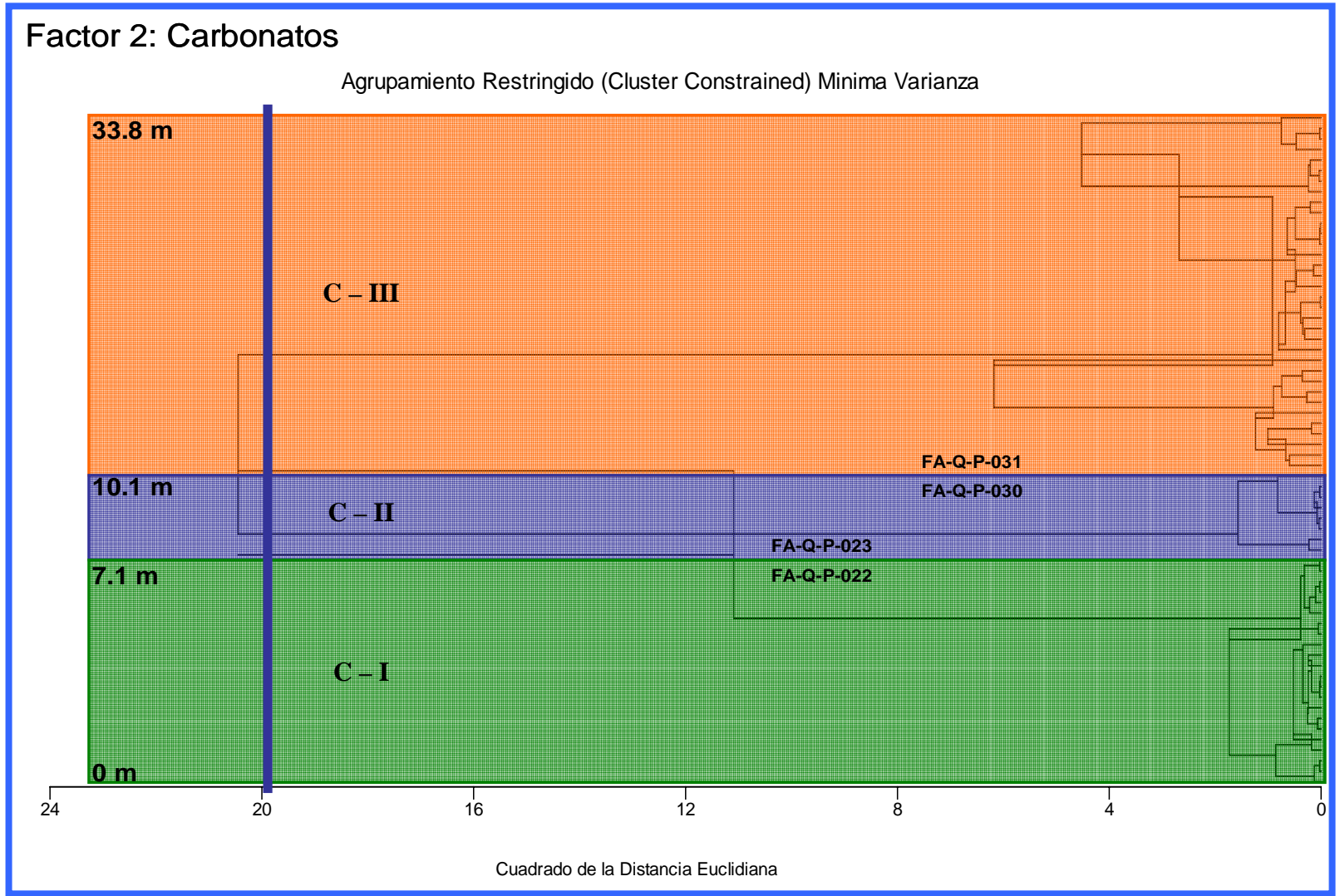


Figura 31: Dendrograma para la asociación clásica – arcillosa mediante el análisis de agrupamiento restringido



**Figura 32:** Dendrograma para la asociación carbonatos mediante el análisis de agrupamiento restringido



### Factor 3: Clásticos – Arenosos

Agrupamiento Restringido (Cluster Constrained) Minima Varianza

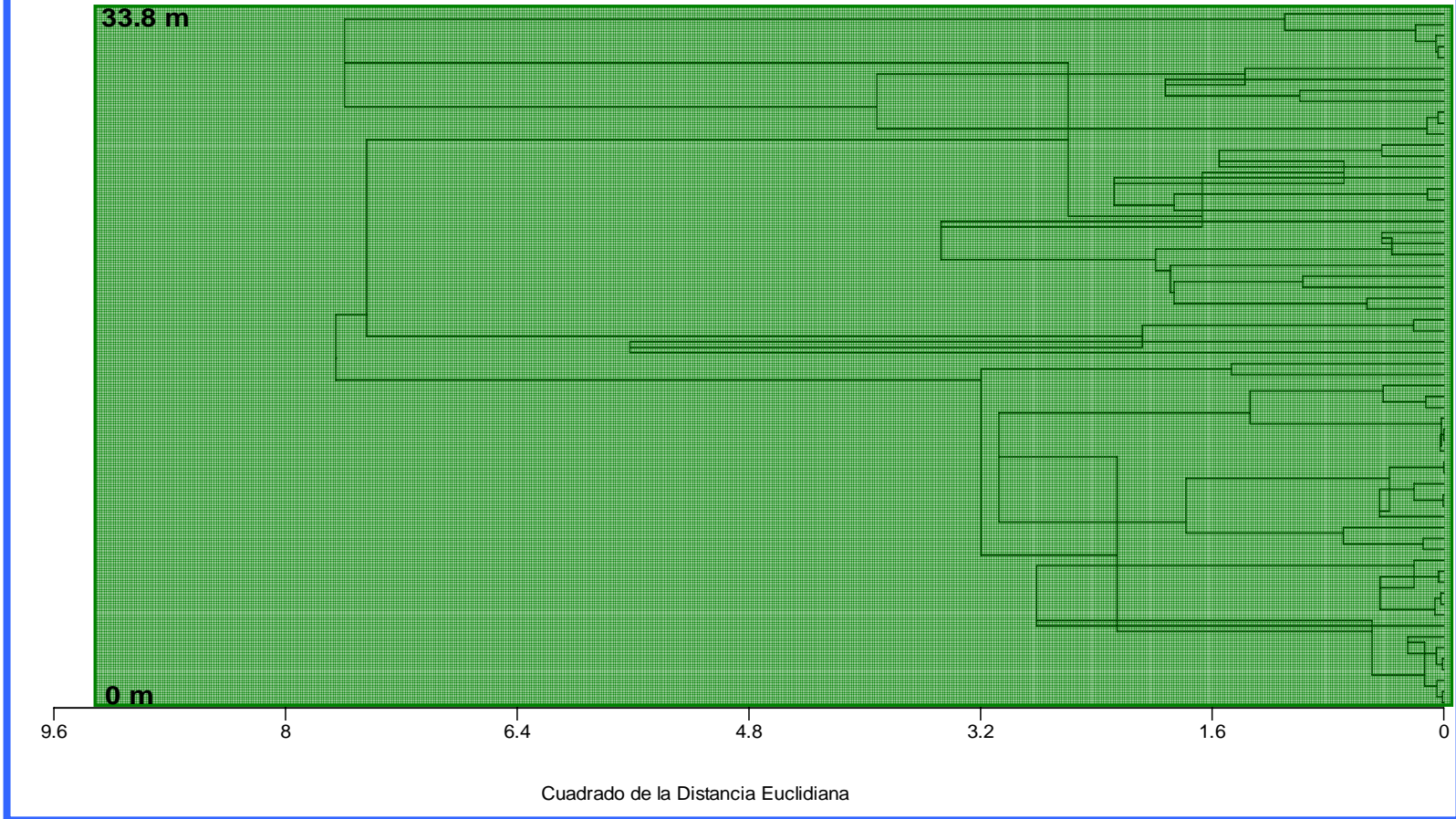


Figura 33: Dendrograma para la asociación clásica – arenosa mediante el análisis de agrupamiento restringido

## Factor 6: Sulfuros

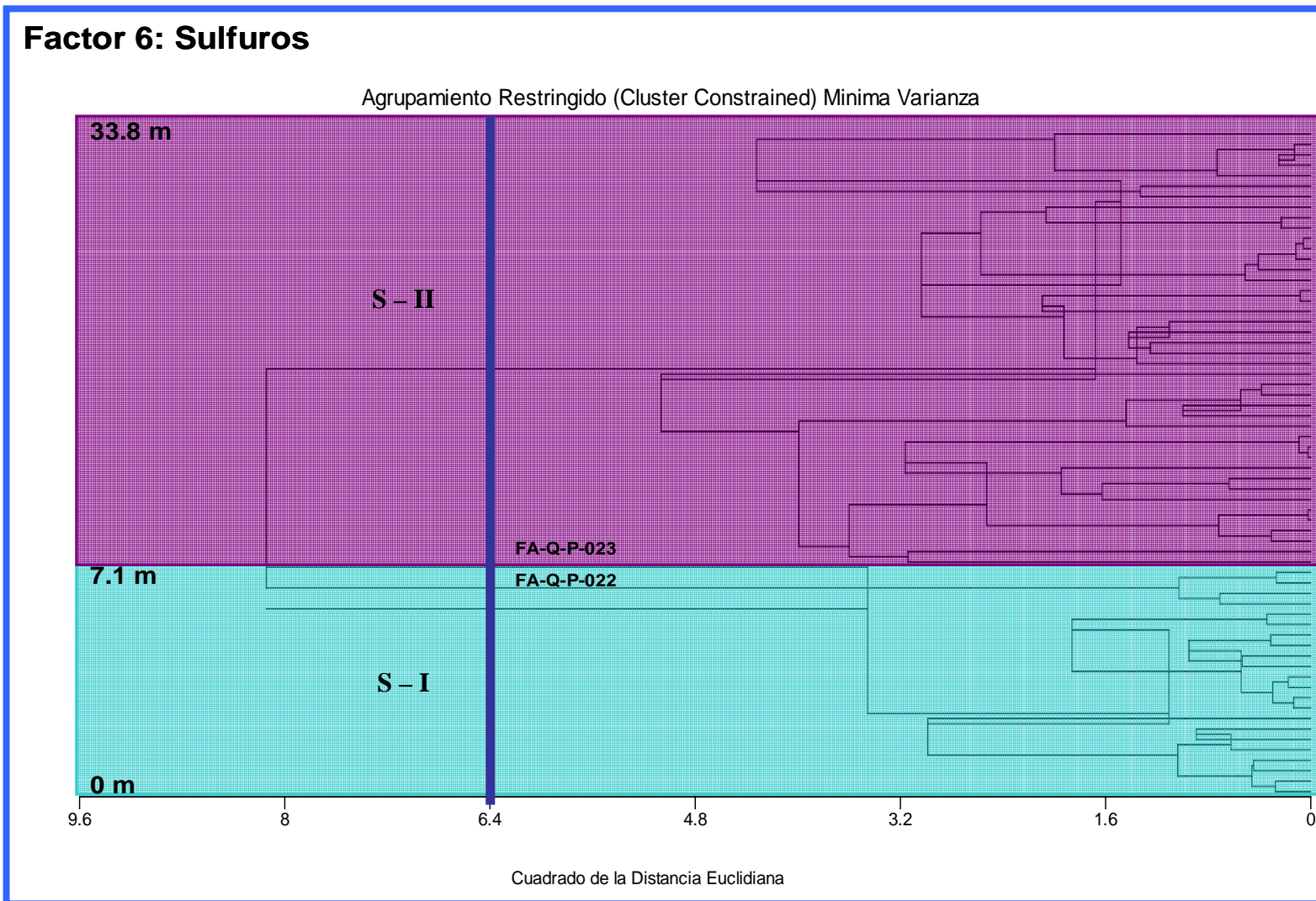


Figura 34: Dendrograma para la asociación sulfuros mediante el análisis de agrupamiento restringido

### **Quimiofacies para la asociación clástica - arcillosa**

El análisis de agrupamiento restringido permitió identificar 3 posibles quimiofacies dentro de la asociación clástica – arcillosa, definidas en la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso (Figura 31). En orden estratigráfico, estas quimiofacies fueron identificadas como:

- **Unidad CA – I:** Comprende desde la base (muestra FA-Q-P 001) hasta los 5,6 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 018).
- **Unidad CA – II:** Abarca desde los 5,6 m (FA-Q-P 019) hasta los 11,6 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 035).
- **Unidad CA – III:** Se extiende desde los 11,6 m (FA-Q-P 037) hasta los 33,8 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 091).

La escala vertical de los dendogramas analizados (figuras 31 – 34) ofrece solamente la posición estratigráfica de las muestras dentro de la columna, pero no representa en si los espesores reales de las unidades litológicas. En este sentido, los perfiles quimioestratigráficos y las curvas de acumulación porcentual para cada elemento o atributo químico evaluado, constituyen una herramienta ampliamente utilizada para visualizar las variaciones de concentración en función de la altura estratigráfica.

Se construyeron los perfiles quimioestratigráficos para la mayoría de los elementos que definieron esta asociación clástico – arcillosa: Sc, V, Y, Cu, Ce, Cr, La y Pb (figuras 35 y 36). Estos perfiles presentaron mejoras visuales normalizando los datos de las concentraciones originales para cada atributo entre la concentración del Al, elemento inmóvil por excelencia y relacionado fuertemente con la fracción arcillosa. La aplicación de esta normalización por el aluminio es necesaria cuando se trabaja con litologías heterogéneas, como es el caso de las muestras analizadas.

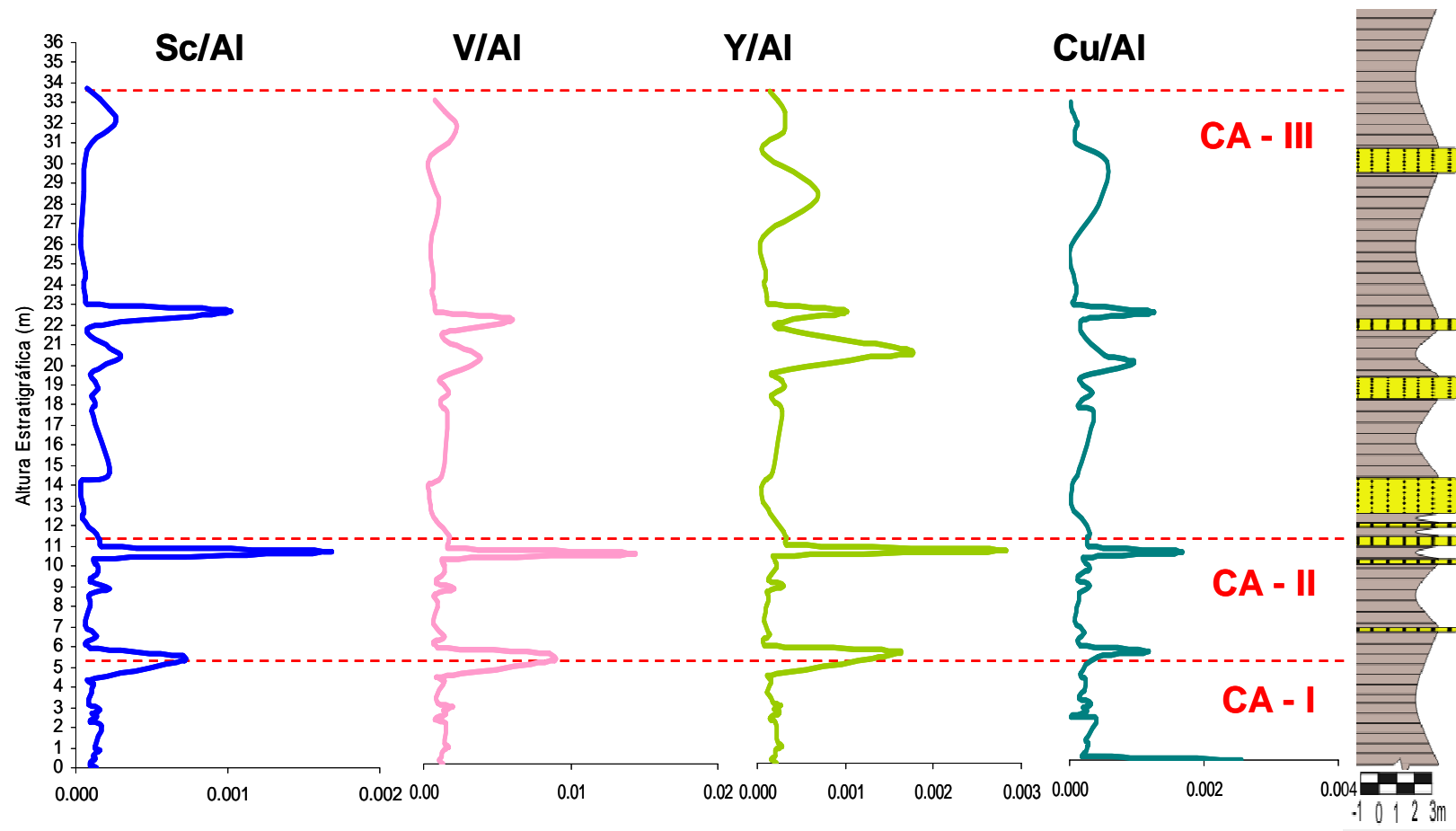
Para confirmar las tendencias o los cambios representativos dentro de los perfiles quimioestratigráficos, se utilizaron las curvas de acumulación porcentual para cada

uno de los elementos anteriores (figuras 37 y 38). Se representó tanto en los perfiles como en las curvas acumuladas, las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis multivariado (CA – I, CA – II y CA – III), las cuales aparecen delimitadas por las líneas rojas punteadas.

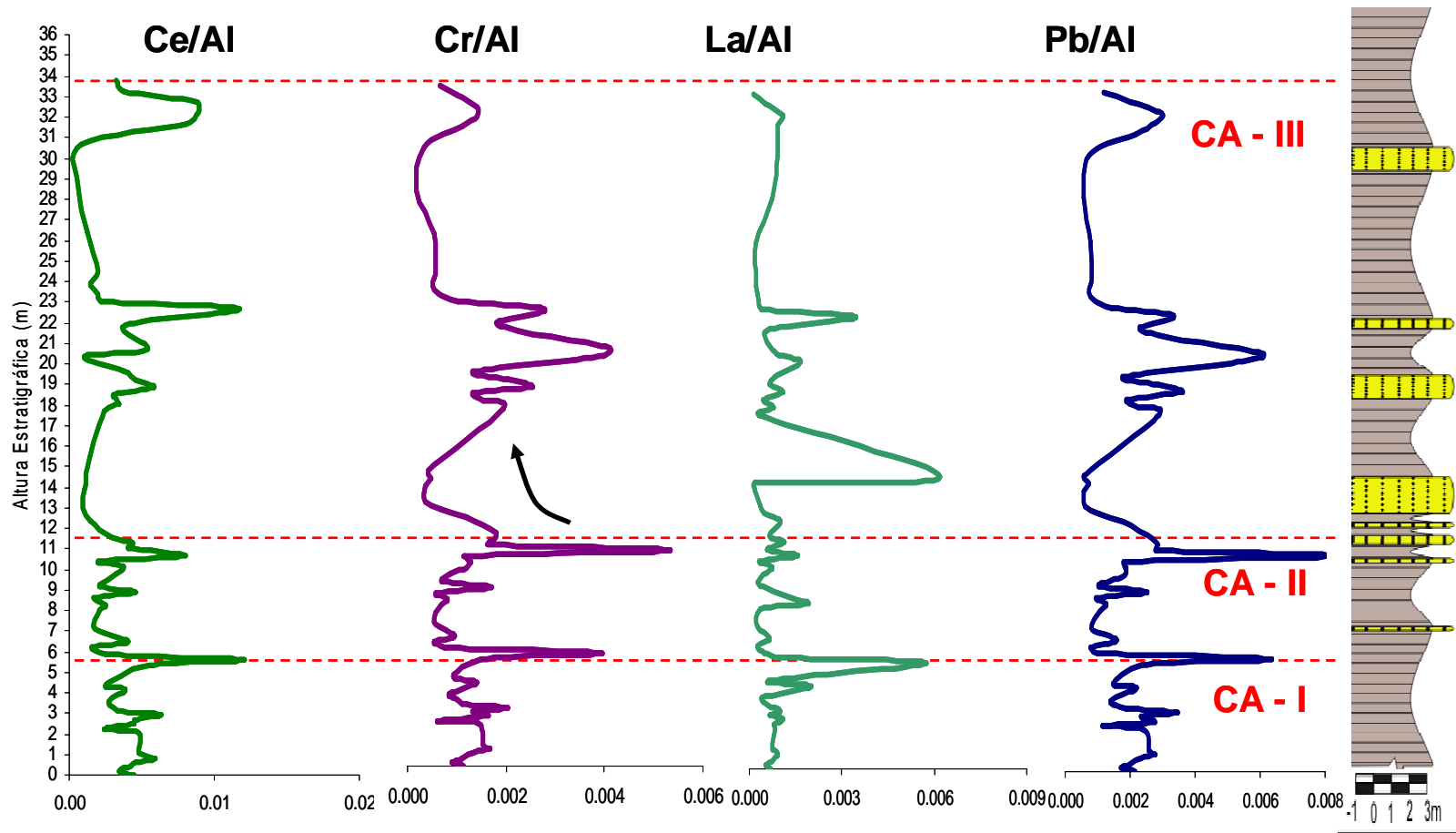
Estas quimiofacies definidas son las de mayor peso para identificar proveniencia sedimentaria, ya que la asociación clástica – arcillosa es la que predomina más dentro de la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso. Adicionalmente, esta asociación agrupa a los elementos comúnmente utilizados como indicadores máficos tales como V, Sc y Cr, así como los indicadores felsicos: Y, Ce y La, entre otros. Los perfiles de los elementos Sc, V, Y y Cu presentan un comportamiento similar entre ellos, de igual forma lo evidencian los perfiles para Ce, Cr, La y Pb (figuras 35 y 36).

A manera general, puede decirse que los cambios importante observados tanto en los perfiles de los elementos asociados a proveniencia como en los puntos de quiebre o inflexiones de las curvas acumuladas, coinciden prácticamente con los límites de las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis de agrupamiento restringido. Indicando que dentro de la secuencia alrededor de los 5,6 y 11,6 m tiende a presentar un mayor aporte de estos elementos, lo que permite delimitar en estos puntos de altura estratigráfica, los límites de las quimiofacies de proveniencia.

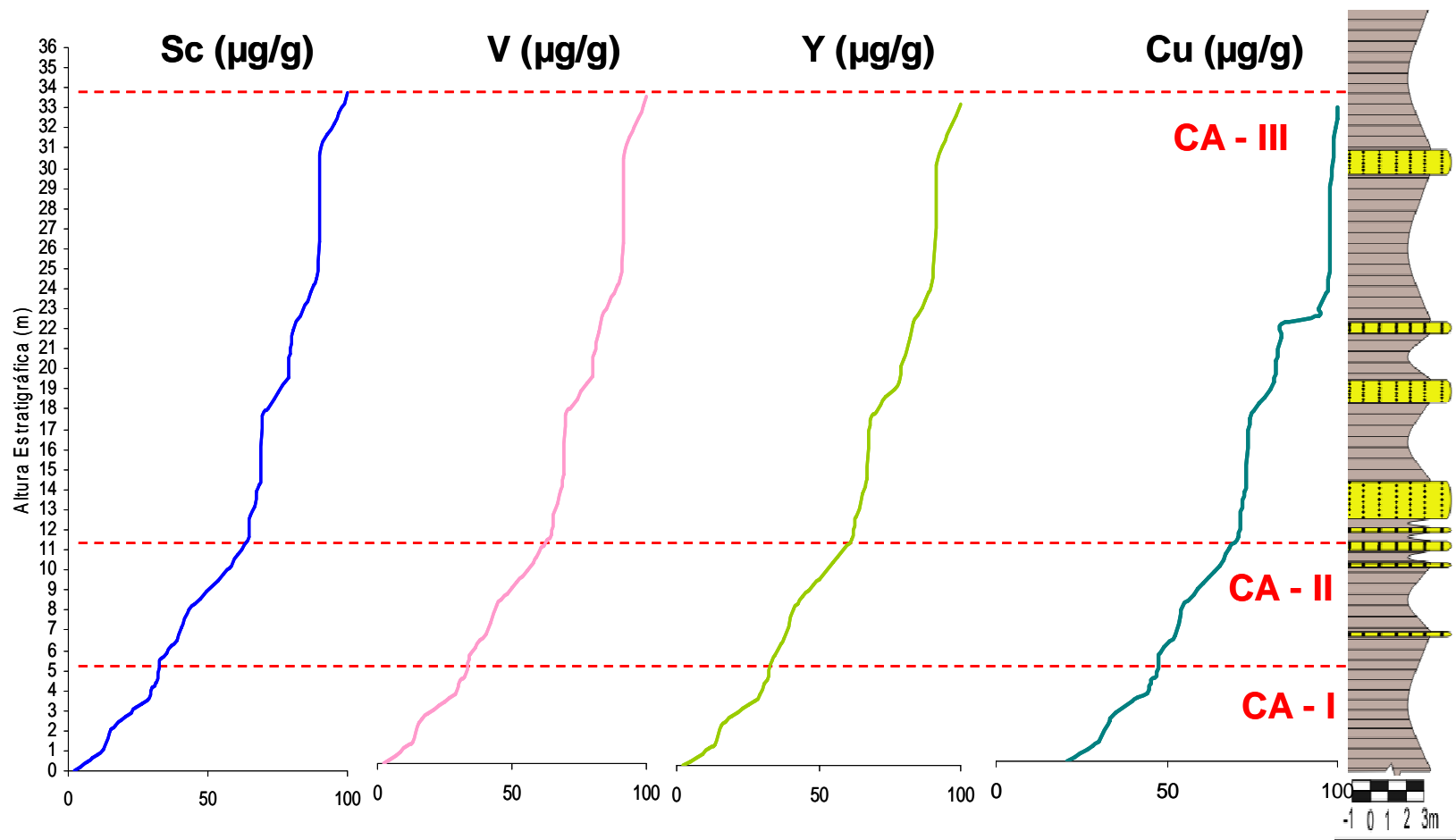
Es importante destacar que alrededor de los 20 m de altura estratigráfica puede apreciarse un cambio en los perfiles y en las curvas acumuladas, pero posiblemente, esta variación no está aportando un peso significativo en la estadística, debido a que el análisis de agrupamiento restringido no reveló ningún límite de quimiofacies de proveniencia dentro de este intervalo estratigráfico.



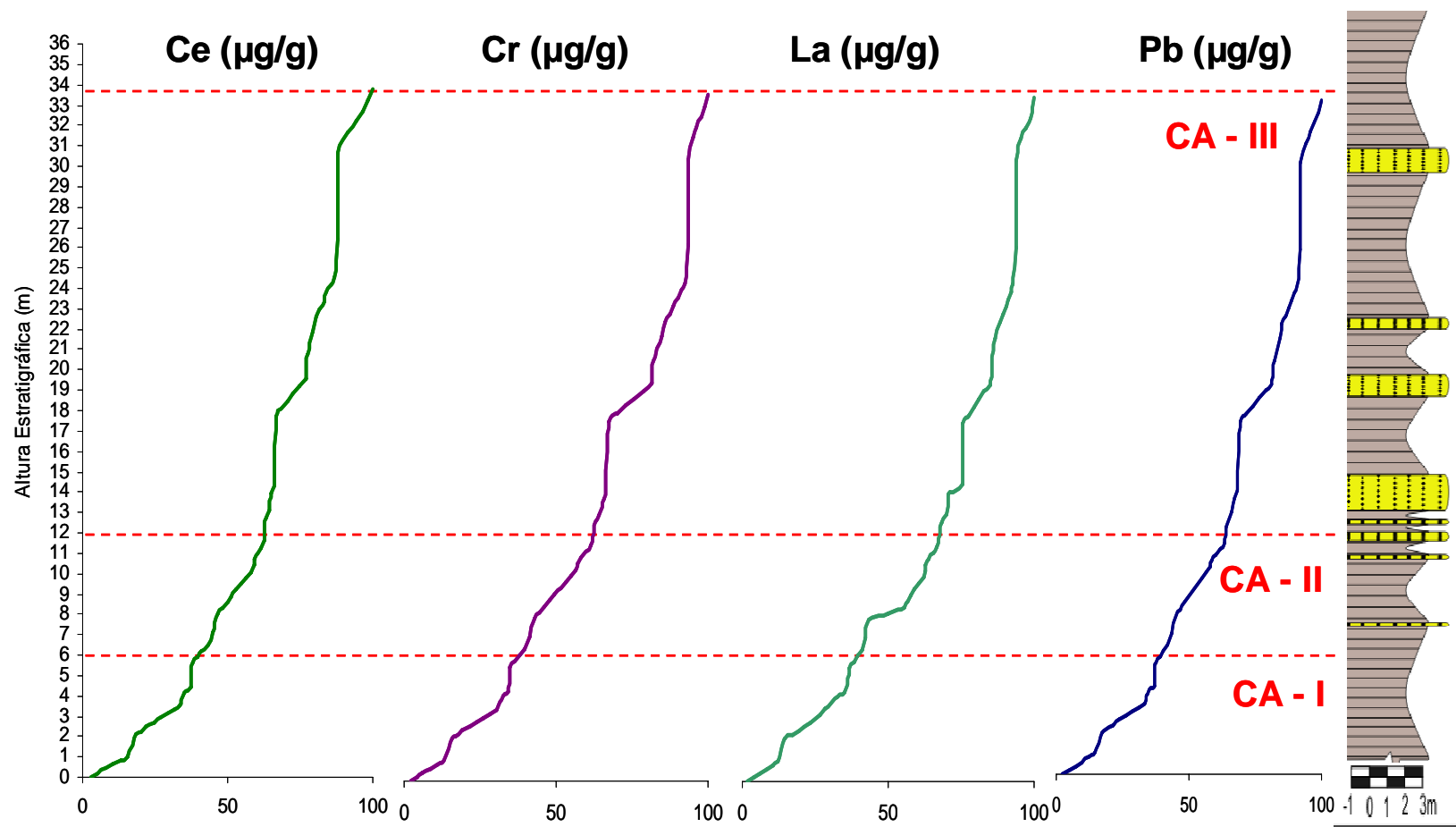
**Figura 35:** Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Sc, V, Y y Cu.



**Figura 36:** *Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Ce, Cr, La y Pb*



**Figura 37:** Curvas de acumulación porcentual para los elementos Sc, V, Y y Cu.



**Figura 38:** Curvas de acumulación porcentual para los elementos Ce, Cr, La y Pb



En conclusión, los perfiles geoquímicos de los elementos Sc, V, Y, Cu, Ce, Cr, La y Pb normalizados con el Al, muestran mayores concentraciones y por lo tanto mayor variabilidad de estos elementos en la base de la sección de estudio, lo que confirma un enriquecimiento relativo de los mismos en este intervalo predominantemente lutítico. Este comportamiento se mantiene aproximadamente hasta los 11,6 m de altura estratigráfica donde ocurre un cambio en la sedimentación, posiblemente un aumento de la energía del medio, debido a que litológicamente, en la secuencia sedimentaria comienzan a aparecer capas más espesas de areniscas y esto coincide con la disminución en la concentración de dichos elementos químicos.

El comportamiento de los perfiles quimioestratigráficos y las curvas de acumulación porcentual desde los 11,6 m de altura estratigráfica hasta el tope de la sección, siguen respondiendo a la afinidad de estos elementos con la fracción arcillosa, es decir, la concentración de los atributos químicos evaluados en este grupo se mantiene constante mientras la secuencia estratigráfica presenta alternancia entre capas de lutitas y areniscas. Cuando se encuentra un paquete netamente lutítico, la distribución de los perfiles manifiesta ese cambio (aproximadamente a los 20 m de altura estratigráfica) corroborando la asociación de estos elementos con las arcillas.

### **Quimiofacies para la asociación carbonatos**

El análisis de agrupamiento restringido permitió identificar 3 posibles quimiofacies dentro de la asociación carbonatos, definidas en la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso (figura 32). En orden estratigráfico, estas quimiofacies fueron identificadas como:

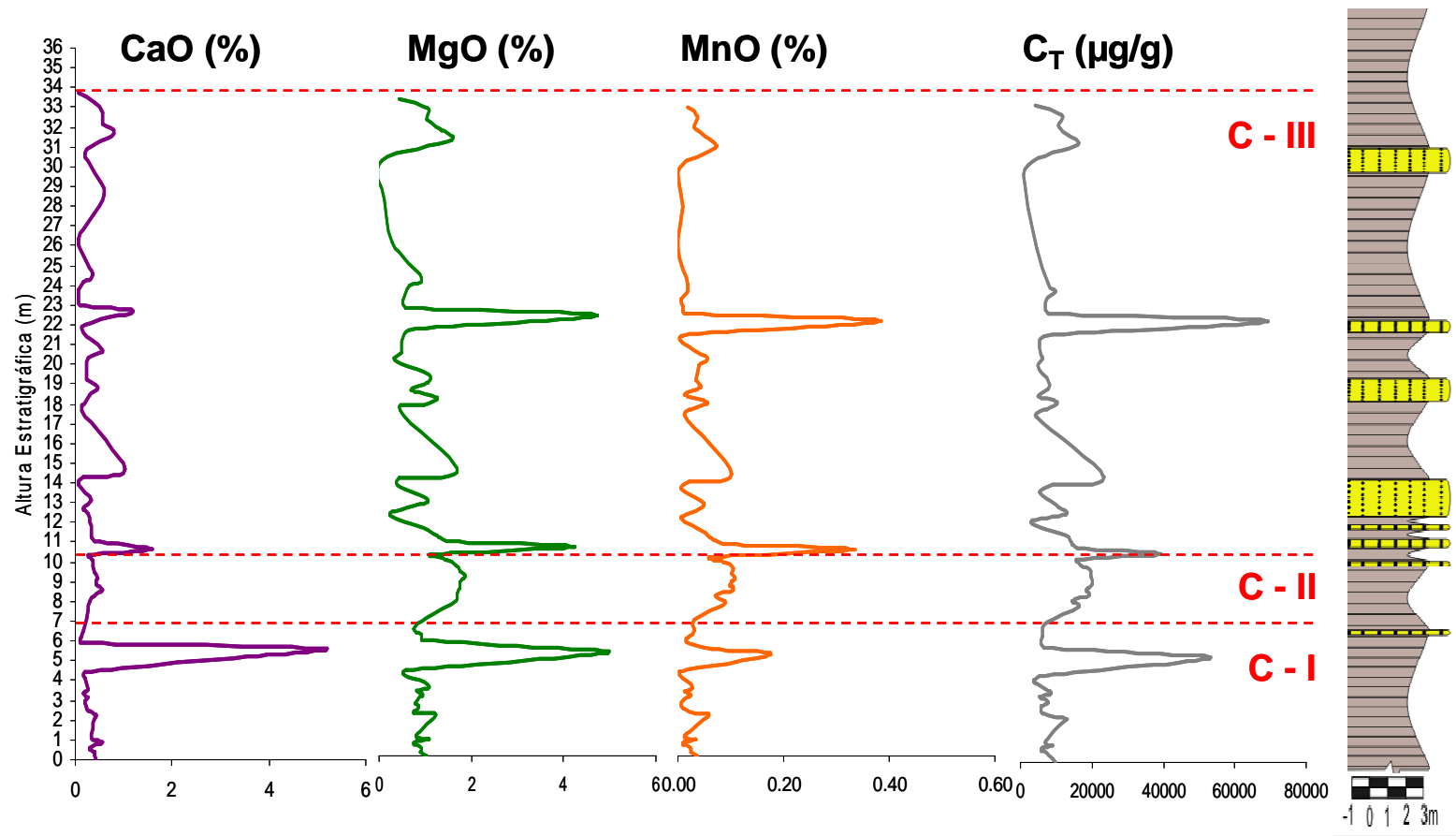
- **Unidad C – I:** Comprende desde la base (muestra FA-Q-P 001) hasta los 7,1 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 022).
- **Unidad C – II:** Abarca desde los 7,1 m (FA-Q-P 023) hasta los 10,1 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 030).

- **Unidad C – III:** Se extiende desde los 10,1 m (FA-Q-P 031) hasta los 33,8 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 091).

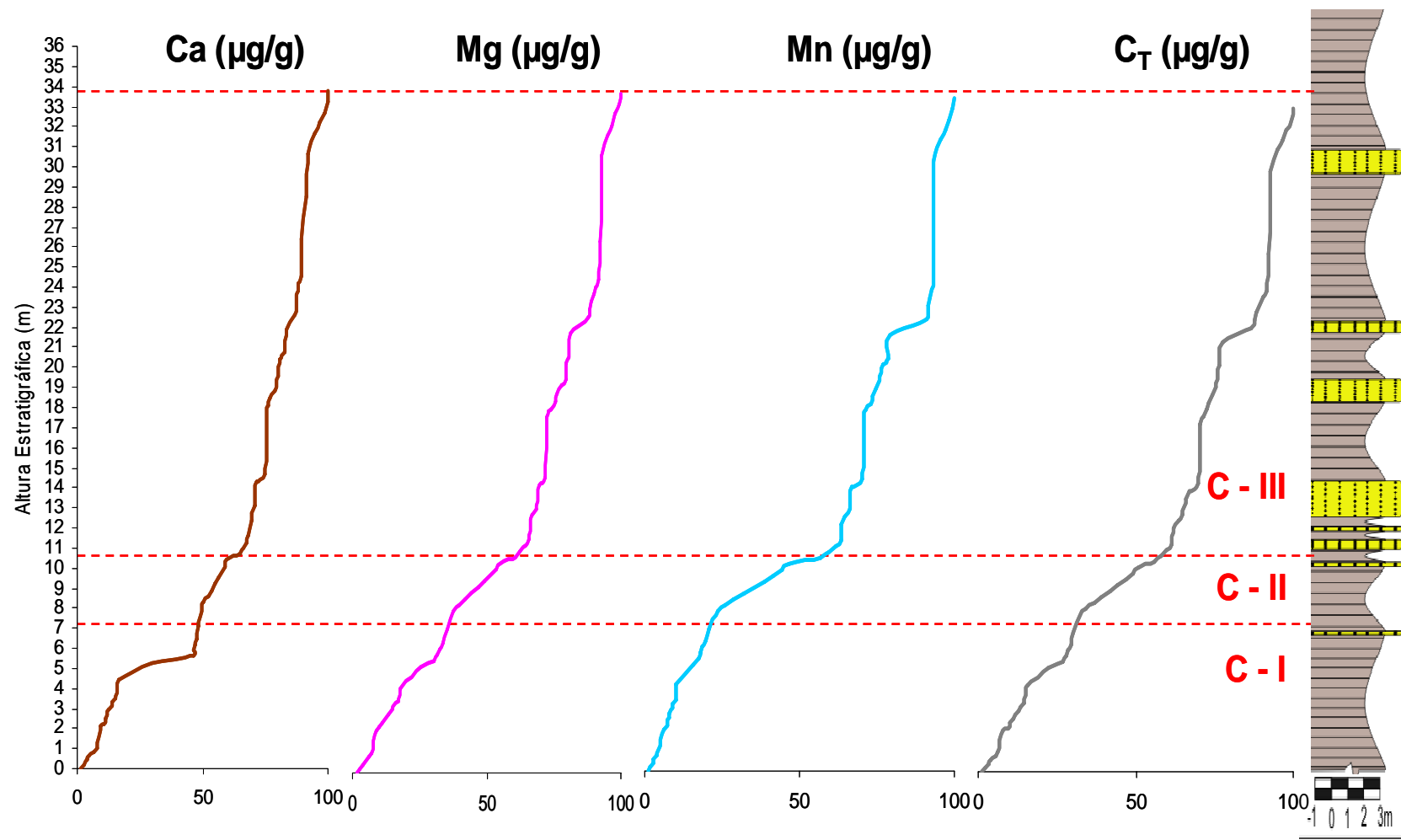
Se construyeron los perfiles quimioestratigráficos para los elementos que definieron esta asociación carbonatos: C, Mg y Mn (figura 39). Adicionalmente se incluyó el perfil para el elemento Ca, a pesar que estadísticamente el mismo no apareció dentro del grupo carbonatos de acuerdo al análisis de factores, pero geoquímicamente presenta un comportamiento similar a sus homólogos indicadores calcáreos. Los perfiles de los elementos Ca, Mg y Mn por ser mayoritarios, presentaron mejoras visuales mostrando las concentraciones originales de sus óxidos correspondientes.

Una vez más para confirmar las tendencias o los cambios representativos dentro de los perfiles quimioestratigráficos, se utilizaron las curvas de acumulación porcentual para cada uno de los elementos anteriores (figura 40). Las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis multivariado (C – I, C – II y C – III) se representaron tanto en los perfiles geoquímicos como en las curvas de acumulación porcentual, delimitadas mediante líneas rojas punteadas.

Los perfiles de los elementos Ca, Mg, Mn y C presentan un comportamiento similar entre ellos (figura 39). Todos estos perfiles quimioestratigráficos muestran tres cambios importantes los cuales coinciden con los intervalos arenosos, asociándose al cemento calcáreo de esta litología. Por consiguiente, cabe destacar que estas quimiofacies definidas con base en la asociación carbonatos dentro de la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso, están reflejando composiciones calcáreas puntuales en la secuencia, producto básicamente de los procesos diagenéticos o post-diagenéticos como la formación de cemento calcáreo y no a eventos relevantes que cambien las condiciones de sedimentación de la cuenca. Este último punto se ve respaldado por la litología presente en la sección de estudio donde sólo podemos apreciar intervalos lutíticos y arenosos con ausencia de capas predominante de calizas o rocas carbonáticas clásicas como tal.



**Figura 39:** *Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Ca, Mg, Mn y C*



**Figura 40:** Curvas de acumulación porcentual para los elementos Ca, Mg, Mn y C

A partir de las figuras anteriores, puede decirse que los límites de las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis de agrupamiento restringido coinciden prácticamente con los cambios importantes observados tanto en los perfiles de los elementos asociados a fases calcáreas como en los puntos de quiebre o inflexiones de las curvas acumuladas. Este resultado indica que dentro de la secuencia sedimentaria alrededor de los 7,1 y 10,1 m tiende a presentarse un mayor aporte de los elementos Ca, Mg, Mn y C, lo que permite delimitar en estos puntos de altura estratigráfica, los límites de las quimiofacies de carbonatos.

Es importante señalar que alrededor de los 22 m de altura estratigráfica puede apreciarse una variación importante en los perfiles y en las curvas acumuladas, pero posiblemente, este cambio no está aportando un peso significativo en la estadística, debido a que el análisis de agrupamiento restringido no reveló ningún límite de quimiofacies de carbonatos dentro de este intervalo estratigráfico.

En conclusión, los perfiles geoquímicos de los elementos Ca, Mg, Mn y C, muestran mayores concentraciones y por lo tanto mayor variabilidad de estos elementos en las areniscas distribuidas a lo largo de la sección de estudio, lo que confirma un enriquecimiento relativo de los mismos en los intervalos arenosos con cemento calcáreo.

El comportamiento de los perfiles quimioestratigráficos y las curvas de acumulación porcentual desde los 10,1 m de altura estratigráfica hasta el tope de la sección, siguen respondiendo a la afinidad de estos elementos con la fracción arenosa calcárea, es decir, la concentración de los atributos químicos evaluados en este grupo se mantiene constante mientras la secuencia estratigráfica presenta los intervalos lutíticos, pero cuando se encuentra un paquete netamente arenoso, la distribución de los perfiles manifiesta ese cambio (aproximadamente a los 22 m de altura estratigráfica) corroborando la asociación de estos elementos en las areniscas con cemento calcáreo.

### **Quimiofacies para la asociación sulfuros**

El análisis de agrupamiento restringido permitió identificar 2 posibles quimiofacies dentro de la asociación sulfuros, definidas en la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso (figura 34). En orden estratigráfico, estas quimiofacies fueron identificadas como:

- **Unidad S – I:** Comprende desde la base (muestra FA-Q-P 001) hasta los 7,1 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 022).
- **Unidad S – II:** Se extiende desde los 7,1 m (FA-Q-P 023) hasta los 33,8 m de altura estratigráfica (FA-Q-P 091).

Se construyeron los perfiles quimioestratigráficos para los elementos que definieron esta asociación sulfuro: Fe, Zn, Ni y S (figura 41). Los perfiles de los elementos Fe y Zn presentaron mejoras visuales normalizando los datos de las concentraciones originales para cada atributo entre la concentración del Al. Como ya se indicó anteriormente, la normalización por el aluminio es necesaria cuando se trabaja con litologías heterogéneas, como es el caso de las muestras analizadas.

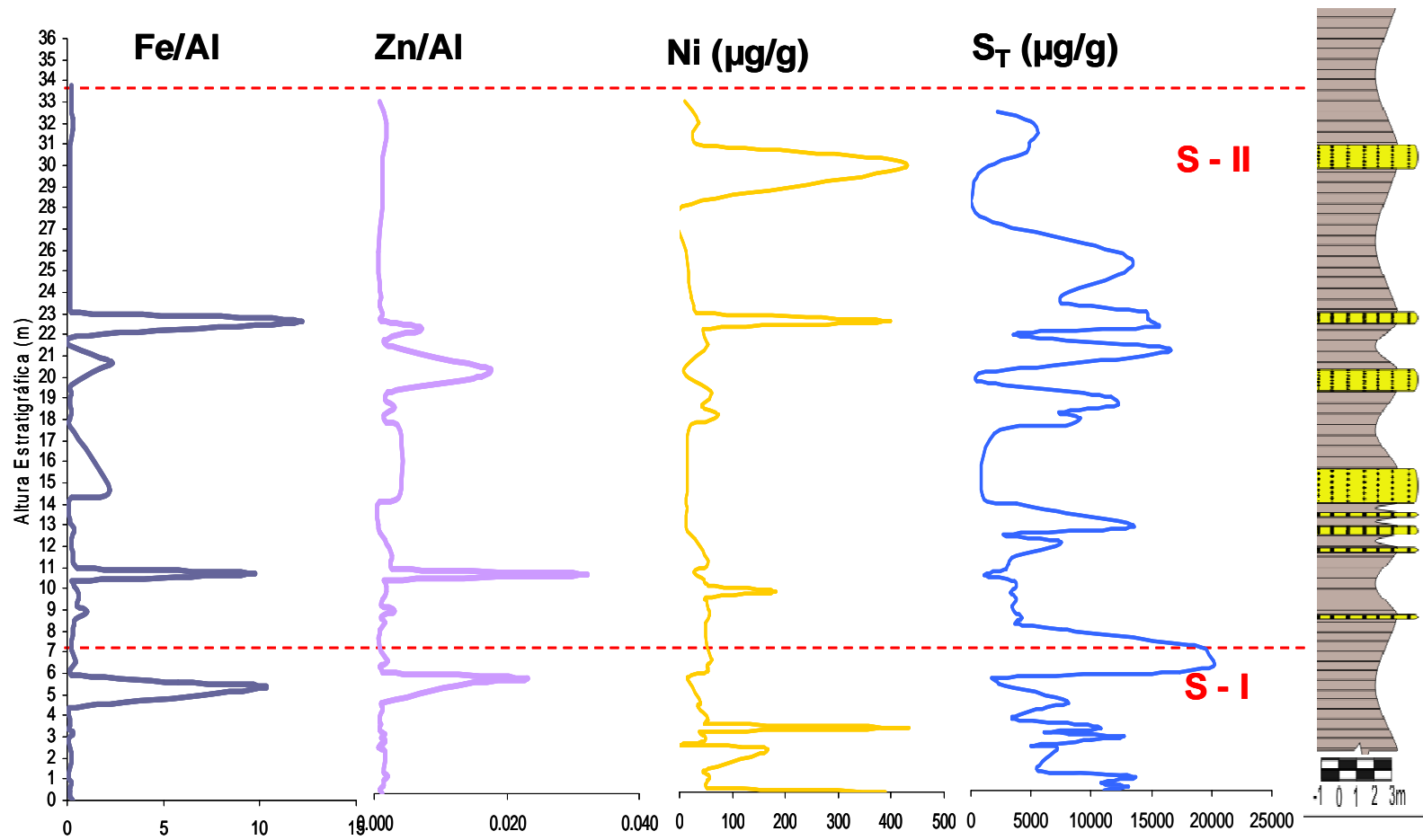
Se utilizaron las curvas de acumulación porcentual de los elementos anteriores (figura 42), para confirmar las tendencias o los cambios representativos dentro de los perfiles quimioestratigráficos. De igual forma, las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis multivariado (S – I y S – II) se representaron tanto en los perfiles geoquímicos como en las curvas de acumulación porcentual, delimitadas mediante líneas rojas punteadas.

Los perfiles de los elementos Fe, Zn, Ni y S presentan un comportamiento similar entre ellos, a excepción del S, el cual muestra un patrón de distribución mucho más variado (figura 41). Los cambios importantes mostrados en estos perfiles quimioestratigráficos coinciden con los intervalos lutíticos que presentaron sulfuros como minerales accesorios. Por consiguiente, cabe destacar que estas quimiofacies

definidas con base en la asociación sulfuros dentro de la secuencia estratigráfica de la Formación El Paraíso, están solamente reflejando procesos diagenéticos o post-diagenéticos como la presencia de jarosita de origen secundario y no a eventos relevantes que indiquen cambios en las condiciones de sedimentación de la cuenca. Este último punto se ve respaldado por la litología presente en la sección de estudio, donde sólo podemos apreciar intervalos lutíticos y arenosos con ausencia de vetas o intrusiones de sulfuros propiamente establecidos como fases formadas durante la sedimentación.

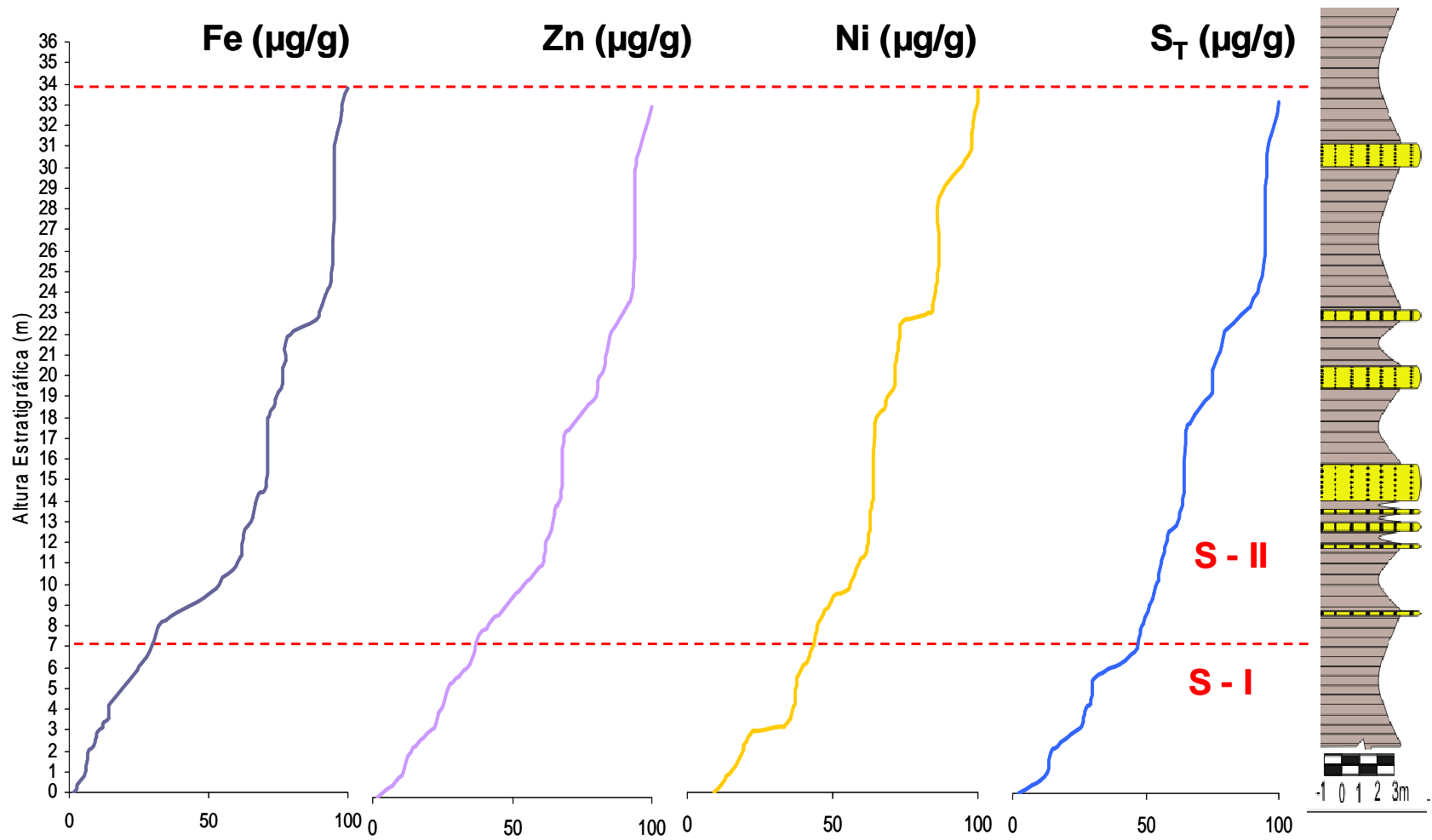
No puede establecerse que los límites de las unidades quimioestratigráficas definidas por el análisis de agrupamiento restringido, coinciden exactamente con los cambios importantes observados tanto en los perfiles de los elementos asociados a la fase sulfuros como en los puntos de quiebre o inflexiones de las curvas acumuladas (figuras 41 y 42, respectivamente). Este resultado indica que, a manera general, dentro de la secuencia sedimentaria tiende a presentarse un pequeño aumento de la concentración de los elementos S, Fe y Zn alrededor de los 7,1 m, lo que permite delimitar en ese punto de altura estratigráfica, el límite de las quimiofacies de sulfuros.

El comportamiento de los perfiles quimioestratigráficos y las curvas de acumulación porcentual desde los 7,1 m de altura estratigráfica hasta el tope de la sección, siguen respondiendo a la afinidad de estos elementos con la fracción arcillosa relacionada a estos sulfuros secundarios. Cabe destacar, que alrededor de los 10 y 22 m de altura estratigráfica puede apreciarse variaciones importantes en los perfiles y en las curvas acumuladas, pero posiblemente, este cambio no está aportando un peso significativo en la estadística, debido a que el análisis de agrupamiento restringido no reveló ningún límite de quimiofacies de sulfuros dentro de estos intervalos estratigráficos.



**Figura 41:** Perfiles quimioestratigráficos para los elementos Fe, Zn, Ni y S





**Figura 42:** *Curvas de acumulación porcentual para los elementos Fe, Zn, Ni y S*

En conclusión, se detectaron tres quimiofacies para la asociación clástica – arcillosa definida. Estas quimiofacies son las únicas que merecen una interpretación estrechamente relacionada con la columna estratigráfica de la Formación El Paraíso, debido a que las mismas están suministrando información sobre las condiciones y procesos que prevalecieron durante la depositación de esta formación. Por tal motivo, se les denominan quimiofacies de proveniencia sedimentaria.

Por el contrario, las tres quimiofacies establecidas para la asociación carbonatos y las dos quimiofacies definidas para la asociación sulfuros, no deberían mostrar una relación ligada a la secuencia estratigráfica, debido a que la presencia de carbonatos y/o sulfuros posiblemente responde a patrones de fracturamiento y percolación de fluidos durante procesos diagenéticos. Por lo tanto, no tiene sentido hablar de aportes calcáreos o sulfuros durante la sedimentación de la Formación El Paraíso, sino que la presencia de ambos está relacionada a procesos diagenéticos o post-diagenéticos.

### **Interpretación general**

La Formación El Paraíso representa una sedimentación relacionada más a condiciones continentales, litorales e incluso fluviales, donde no fue posible la formación y preservación de carbonatos y materia orgánica. Las fases calcáreas encontradas están relacionadas más a procesos diagenéticos o post-diagenéticos como la formación de cemento calcáreo y no a eventos relevantes que cambiaron las condiciones de sedimentación de la cuenca.

La composición de los sedimentos que dieron origen a esta formación, caen dentro del campo félsico – metamórfico, posiblemente granitos, esquistos cuarzo-micáceos, gneises graníticos, entre otras litologías similares; y en el campo de carácter intermedio constituido por rocas sedimentarias preexistentes. Por consiguiente, la interpretación global de los resultados permite proponer, para ese intervalo geológico, que la fuente que pudo haber aportado los sedimentos que conforman esa sección de

la Formación El Paraíso, fue una fuente tipo Cordillera de La Costa y rocas sedimentarias previamente depositadas (Cretáceo-Paleógeno).

La comparación de las concentraciones promedio de los elementos químicos medidos en las lutitas de la Formación El Paraíso con la composición de la lutita promedio mundial, tomando los valores reportados por Turekian y Wedepohl (1961), y los valores más recientes de las lutitas australianas Post Arqueano [PAAS - Post Archean Australian Shales] (Cullers, 2002); no evidencian variaciones significativas excepto en algunos elementos químicos tales como: Ba – Ca – Ce – Cu – Mg – Mn – S – Si – Sr – Zn.

De igual forma, al comparar las lutitas promedio de la Formación El Paraíso (Oligoceno Temprano a Medio) con respecto a las lutitas de la Formación Pecaya (Oligoceno Medio a Mioceno Temprano), para determinar si existe o no algún cambio significativo en el ambiente de depositación o en la fuente de los sedimentos, se encontró que la diferencia fundamental entre ambas formaciones es el cambio en el ambiente sedimentario y por consiguiente un aumento de profundidad o subsidencia de la cuenca para permitir la depositación de los carbonatos de la Formación Pecaya, que la distingue de la Formación El Paraíso. Adicionalmente, los resultados sugieren que no existe cambio aparente en la composición de la fuente que dio origen tanto a la Formación Pecaya como a la Formación El Paraíso.

La relación V/Cr, el bajo porcentaje de carbono total determinado en las muestras y las correlaciones entre los elementos Ni, Cu, Cr, V y Zn permitieron interpretar que las posibles condiciones redox imperantes para el momento de la depositación de la Formación El Paraíso fueron totalmente oxidantes.

A través del empleo de análisis de factores componentes principales se identificaron cinco posibles asociaciones geoquímicas: clástica – arcillosa, carbonatos, clástica – arenosa, sulfuros y diagenética; y con el análisis de agrupamiento restringido se pudo

identificar las posibles quimiofacies definidas en la secuencia sedimentaria de la Formación El Paraíso. Por lo tanto, fue posible detectar 3 quimiofacies de proveniencia, así como 3 quimiofacies de carbonatos y 2 quimiofacies de sulfuros, relacionadas estas últimas a procesos diagenéticos.

## CAPÍTULO IX

### CONCLUSIONES

1. La composición de los sedimentos que dieron origen a la Formación El Paraíso esta controlada por cinco procesos geoquímicos: clástico – arcilloso (Al, Ba, Ce, Cr, Cu, La, Pb, Sc, Sr, V, Y), carbonatos (C<sub>T</sub>, Mg, Mn), clástico – arenoso (Si, Ti, Zr), sulfuros (Fe, Ni, S, Zn) y diagenético. La estadística multivariada a través del método de análisis de factores permitió proponer estas cinco asociaciones geoquímicas.
2. La integración de los resultados obtenidos mediante el análisis de agrupamiento restringido, los perfiles quimioestratigráficos y las curvas de acumulación porcentual, permitió plantear la existencia de 3 quimiofacies de proveniencia dentro de la secuencia sedimentaria analizada. Adicionalmente, se proponen 3 quimiofacies de carbonatos y 2 quimiofacies de sulfuros asociadas a procesos diagenéticos o post-diagenéticos.
3. Los diagramas de dispersión y las relaciones interelementales evidenciaron que la fuente de sedimentos que permitió la sedimentación de la Formación El Paraíso a principio del Oligoceno, presentó una composición félsica – metamórfica – intermedia, la cual corresponde posiblemente a una fuente tipo Cordillera de La Costa y rocas sedimentarias previamente depositadas (Cretáceo-Paleógeno).
4. Las condiciones redox imperantes para el momento de la depositación de la Formación El Paraíso fueron totalmente oxidantes, gracias a la información que suministró la relación V/Cr, el bajo porcentaje de carbono total determinado en las muestras y las correlaciones entre los elementos Ni, Cu,

Cr, V y Zn.

5. El posible ambiente sedimentario para la Formación El Paraíso corresponde a un ambiente terrestre continental, con niveles de baja y mediana energía, los cuales permitieron la acumulación de litologías de grano fino intercaladas en menor proporción con capas de rocas más gruesas, pero las condiciones fisicoquímicas del medio no le permitieron preservar materia orgánica, por lo tanto, esta formación carece de interés como posible roca madre.
  
6. La diferencia fundamental entre la sedimentación de la Formación El Paraíso y la Formación Pecaya, es el contenido calcáreo y por consiguiente un aumento de profundidad o máxima subsidencia de la cuenca durante la sedimentación de la Formación Pecaya. No existe diferencia aparente entre la composición de la fuente que dio origen a ambas formaciones.

## **CAPÍTULO X**

### **RECOMENDACIONES**

1. La interpretación de los resultados obtenidos puede complementarse con análisis petrográficos, que permitan evaluar eventos diagenéticos como: compactación mecánica, cementación de calcita y/o sílice, piritización, reemplazo, entre otros procesos de alteración.
2. Identificar minerales accesorios y diagnósticos mediante difracción de rayos X, para validar las inferencias hechas con respecto a la composición de la roca fuente de los sedimentos, así como sustentar los enriquecimientos relativos de algunos elementos determinados en las muestras.
3. Ampliar la densidad de muestreo y análisis de las rocas duras expuestas en la sección, para realizar posibles interpretaciones de las condiciones tectónicas que prevalecieron durante el inicio del Oligoceno, mediante los diagramas tectónicos de Bathia (1983), entre otros.
4. Aplicar esta investigación a las formaciones Jarillal y Santa Rita con la finalidad de establecer comparaciones con la Formación El Paraíso estudiada.

## CAPÍTULO XI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### Abreviaturas:

**UCV-TEG** = Trabajo Especial de Grado, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

**UCV-TA** = Trabajo de Ascenso, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

**UCV-TEGC** = Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

- ANDERSSON, P., WORDEN, R. HODGSON, D. Y FLINT, S. (2004) Provenance evolution and chemostratigraphy of a Paleozoic submarine fan-complex, Tanqua Karoo Basin, South Africa. *Marine and Petroleum Geology*. 21, 555 – 577 p.
- ARIZA, M. (2006) Caracterización quimioestratigráfica del límite Eoceno - Oligoceno de la zona surcentral de la cuenca de Falcón. UCV – TEG. 142 p.
- AUDEMARD, F. (1995) La cuenca terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental, síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica. IX Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo 1. 93 – 100 p.
- AUDEMARD, F. (1997) Tectónica activa de la región septentrional de la cuenca invertida de Falcón, Venezuela occidental. *Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano*. Tomo 1. 93 – 100 p.



- BATHIA, M. (1983). Plate tectonics and geochemical composition of sandstone. *Journal of Geology*, v. 91, p 611 – 627 p.
- BELLANCA, A., MASETTI, D., NERI, R. & VENEZIA, F. (1999) Geochemical and sedimentological evidence of productivity cycles recorded in Toarcian black shales from the Belluno Basin, Southern Alps, Northern Italy. *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 69, No. 2. 466 – 476 p.
- BERMUDEZ, E; LÓPEZ, M & TROCONIS, M (2003). Estudio de litofacies, diagénesis, procedencia y quimioestratigrafía de la Formación Cerro Pelado, cuenca de Falcón, como herramienta para determinar su potencialidad generadora y almacenadota de hidrocarburos. UCV - TEG. 2 Tomos.
- BERROTERÁN, L y ZIRITT, F (2004). Interpretación estructural y restauración de secciones de un transecto ubicado entre los poblados Purureche, Estado falcón y Baragua, estado Lara. UCV – TEG. 95 p.
- BOESI, T. y GODDARD, D (1991). A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcon Basin, northwestern Venezuela. *American Association of Petroleum Geologist*. Mem. 48, 309 – 319 p.
- CÁMEL, F. (2002). Estadística médica y planificación de la salud. Tomo I y II. Universidad de los Andes, Consejo de publicaciones. Mérida, Venezuela.
- CAMPOSANO, L. & MARTÍNEZ, N (2000). Caracterización química y radiométrica de secciones estratigráficas de las formaciones Barco y Mirador, San Pedro del Río, estado Táchira. Trabajo especial de grado, no publicado. UCV – TEG. 135 p.

- CASTRO, G (2002). Quimioestratigrafía de la sección superior de la Formación Cerro Pelado (Mioceno), Cuenca de Falcón, Venezuela. UCV – TEGC. 107 p.
- CORONEL, G. (1970). Igneous rocks of central Falcón. Boletín Informativo Asociación Venezolana de Geología, Minas y Petróleo; 13 (5): 155 – 159 p.
- CULLERS, R. (2000). The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennylvanian-Permian age, Colorado, U.S.A.: implications for provenance and metamorphic studies. Lithos 51, 181 – 203 p.
- DE ABREU, D. (2005). Estudio quimioestratigráfico de las lutitas de la Formación El Paraíso, quebrada Paraíso, estado Falcón, Venezuela. UCV-TEGC. 90 p.
- DE TONI, B., DI CROCE, J. y AUDEMARD, F (2001) The Falcon basin: A north vergent Neogene folded belt. AAPG Annual Meeting 2001: An energy odyssey.
- DIAZ, L. (1976) Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del centro de la cuenca de Falcón, Venezuela. UCV-TA. 266 p.
- DÍAZ DE GAMERO, M (1977). Estratigrafía y Micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del Centro de la Cuenca de Falcón, Venezuela. GEOS (22): 3- 60 p.
- DÍAZ DE GAMERO, M (1985). Estratigrafía de Falcón Nororiental. Memorias del VI Congreso Geológico Venezolano. Tomo 1. 93 – 100 p.

- DÍAZ DE GAMERO, M. (1989). El Mioceno Temprano y Medio de Falcón Septentrional. Jornadas 50 Aniversario Escuela de Geología, UCV. GEOS 29. 25-35 p.
- ESCORIHUELA, N & RONDÓN, J (2002). Estudio de las rocas ígneas que afloran en la parte central de la cuenca de Falcón. UCV - TEG. 128 p.
- FONT, E., NEDELEC, A., TRINDADE, R., MACOUIN, M. y CHARRIERE, A. (2006) Chemostratigraphy of the Neoproterozoic Mirasol d'Oeste cap dolostones (Mato Grosso, Brazil): An alternative model for Marinoan cap dolostone formation. Earth and Planetary Science Letters, vol.250. 89 – 103 p.
- FRALICK, P Y KRONBERG, B (1997). Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. Sedimentary Geology, vol. 113. 111 – 124 p.
- GARNER, A (1926) Suggested nomenclature and correlation of the geological Formations in Venezuela. Am. Inst. Min. And Met. Eng., Trans., Petrol. Develop. And techn. 1n 1925. 677-684 p.
- GONZÁLEZ, L y SÁNCHEZ, G (2001). Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la Formación La Luna, en el estado Táchira. UCV - TEG. 145 p.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE, J. y PICARD, X. (1980) Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Ediciones Foninves. Tomo I y II, 1031 p.
- GUERRA, E (2002). Quimioestratigrafía de la sección inferior de la Formación Cerro Pelado (Mioceno), Cuenca de Falcón, Venezuela. UCV – TEGC. 163 p.

- HALSE, G. W (1937) La bioestratigrafía del occidente del distrito Buchivacoa, estado Falcón, Venezuela. Bol. Geol. Y Min. (Venezuela), vol.1, nº 2-4, pág. 183-193.
- HODSON, F (1926). Venezuelan and Caribbean Turritellas, with a list of Venezuela type stratigraphic localities, Bull. Amer. Paleont., 11(45): 173-220 p.
- HUNTER, V & FERRELL, A (1972). Redefinición de algunas unidades estratigráficas del Oligoceno del Falcón central, III Congreso Geológico Venezolano. Mem. 2: 807-816 p.
- JARVIS, I., MORETON, J., GERARD, M. (1998). Chemostratigraphy of Madeira abyssal plain Miocene-Pleistocene turbidites, site 950, en: Weaver P. P. E., Schmincke H. U., Firth J. V., Duffield W. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 157. 535 – 558 p.
- JARVIS, I., MURPHY, A., GALE, A (2001). Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: criteria for identifying systems tracts and sea-level change. Journal of the Geological Society, London, Volumen, 158. 685 – 696 p.
- JONES, B. y MANNING, D (1994). Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. Chemical Geology. Volumen 111. 111 – 129 p.
- LEAL, F. y RIVERO, O (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 geológica del río Paraíso. UCV - TEG. 196 p.

- LENA, P (1979). Geología sedimentaria de una zona de los distritos Miranda y Democracia, estado Falcón. UCV - TEG. 180 p.
- LIBERATORE, P (1993) Determination of major elements in geological samples by ICP – AES. Varian ICP at Work 12.
- LIBERATORE, P (1994) Determination of trace elements in geological samples by ICP – AES. Varian ICP at Work 16.
- LIDDLE, R (1928). The geology of Venezuela and Trinidad. J. P. MacGowan, 552 p.
- MACELLARI, C. (1995). Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia, in A. J. TANKARD, R. SUÁREZ S., and H.J. WELSINK, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir (62): 757- 780 p.
- MARTÍNEZ, A (2001). Identificación y caracterización de quimiofacies de la Formación Barco en la localidad de San Pedro del Río, Estado Táchira. UCV – TEGC. 139 p.
- MASON y MOORE (1982). Principles of geochemistry. John Wiley & Sons, 350 p.
- MATA, L. (2001). Estudio quimioestratigráfico de la Formación La Luna, estado Táchira. UCV – TEGC. 163 p.
- MEDINA, L (1979). Geología sedimentaria de una zona de los Distritos Miranda y Democracia, edo. Falcón. UCV - TEG. 145 p.

- MÉNDEZ, A (2006). Proveniencia de los sedimentos que dieron origen a la Formación Pecaya, mediante su estudio quimioestratigráfico. UCV – TEGC. 140 p.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (1997) Léxico Estratigráfico. Tercera Edición. 2 tomos. Disponible en: <http://www.pdv.com.ve/lexico/>
- MINISTERIO DE MINAS E HIDROCARBUROS (1976) Mapa geológico estructural de Venezuela. Ediciones Foninves. Recopilado por: Bellizzia, A; Pimentel, N y Bajo, R.
- MONTERO, J., GUTIERREZ J., MARTÍNEZ, M., ESTEVES, I. y BARRÁEZ, D. (2005) Multivariate análisis applied to stratigraphic geochemical data: Identification of chemofacies and correlation of sections. *Mathematical Geology*. Sometido a publicación.
- MONTILLA, L. (2006) Geoquímica sedimentaria y quimioestratigrafía de dos secciones del Cretácico Superior en el estado Táchira, Venezuela. UCV – TEG. 144 p.
- MORFORD, J. y EMERSON, S. (1999) The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 63. No. 11/12. 1735 – 1750 p.
- MUESSIG, K. (1984). Structure and Cenozoic tectonics of the Falcón basin, Venezuela and adjacent areas, in W. E. Bonini, R. B. Hargraves and Shagam, eds. *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics: GSA Memoir (162): 217-230 p.*

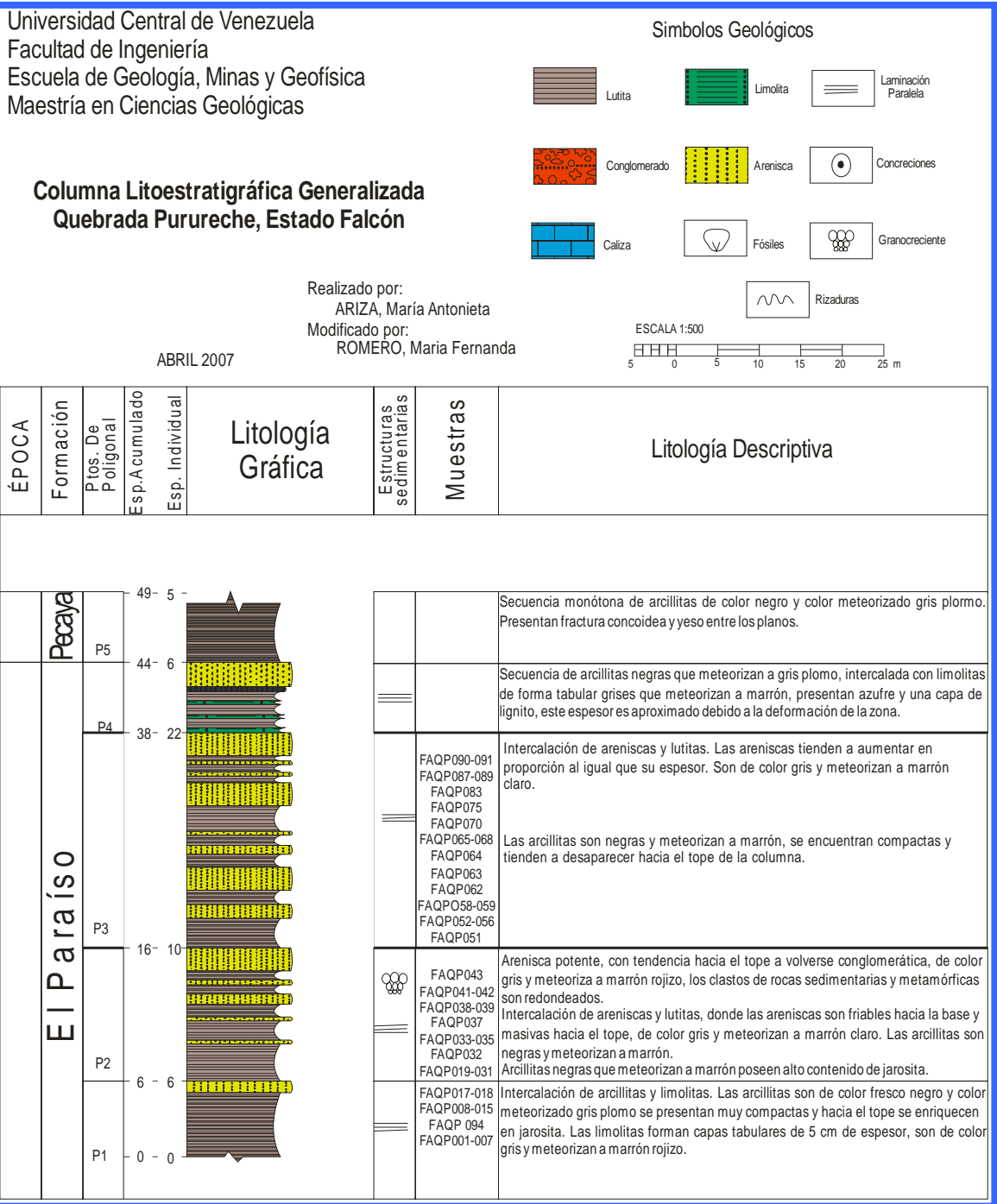
- NOGUERA, M. y YÉPEZ, S (2002). Caracterización química de secciones estratigráficas: Formaciones Naricual y Querecual, Estados Anzoátegui y Monagas. UCV – TEG. 287 p.
  
- PEARCE, T. (1994) Chemostratigraphy – A new tool for the correlation of ancient sequences. Chemostrat consultant. Disponible en: <http://www.chemostrat.co.uk/>
  
- PEARCE, T., BESLY, B., WRAY, D. & WRIGHT, D. (1999) Chemostratigraphic: A method to improved interwell correlation in barren sequences – a case study using onshore. Duckmantian/Stephanian Sequences (West midlands, U. K.) Sedimentary Geology 124. 197 – 220 p.
  
- PÉREZ, D.; KISER, G.; MAXIMOWITSCH, B. y YOUNG, G. (1980) Geología de Venezuela. En : Felder, B. (Coord.), Brie, A. ;Gartner, J. ; Hepp, V.; Hrabie, M ; Kervella, M. ; Mons., F. ; Mowat, G. ; Neville, N. ; Plomb, J.; Sadras, W. ; Tejada, A. ; Trassard, J. ; Vidal, J. Y Zinat, D.: Evaluación de formaciones en Venezuela. Schlumberger Surencó S.A. 1ra. Edición: 287 p.
  
- PIOVANO, E., ROMAN, G., RIBEIRO, S., ARRIBERE, M & DEPETRIS, P. (1999) Geochemical tracers of source rocks in a Cretaceous to Quaternary sedimentary sequence (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina). Journal of South American Earth Sciences 12. 489 – 500 p.
  
- REÁTEGUI, K (2001). Identificación e interpretación de quimiofacies de la Formación Mirador, en la localidad de San Pedro del Río, estado Táchira. UCV – TEGC. 116 p.

- RIMMER, S. (2004) Gechemical paleoredox indicators in Devonian – Mississippian black shales, central Appalachian Basin (USA). *Chemical Geology* 206. 373 – 391 p.
- RIVERO, F de. (1956). Formación El Paraíso, in Ministerio de Minas e Hidrocarburos, *Léxico Estratigráfico de Venezuela*, Bol. Geol. (Venezuela), Publ. Esp. 1: 254- 257.
- ROMERO, Y. y SALAS, R (2004). Estudio de litofacies del Eoceno Superior – Mioceno en la zona centro occidental de la cuenca de Falcón, sección sureste de la población Pedregal. UCV - TEG. 175 p.
- SENN, A. (1935). Die stratigraphische Verbreitung der Tertiären Orbitoiden, mit spezieller Berücksichtigung ihres Vorkommens in Nord- Venezuela und Nord-Marokko. *Eclog. geol. Helv.*, 28 (1): 51-113 & 369-373 p.
- SUTTON, F (1946). *Geology of Maracaibo Basin, Venezuela*, American Association of Petroleum Geologists. Bulletin 30(10): 1621-1741 p.
- WALKER, C. (1963) Size fractionation applied to gechemical studies of boron in sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol 33. 694 – 702 p.
- WHEELER, C. (1960) Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno inferior de Falcón occidental y nororiental, III Congreso Geológico Venezolano. *Memorias*, I: 407-465 p.
- WHEELER, C (1963) Oligocene and lower Miocene stratigraphy of western and northeastern Falcón Basin, Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin* 47, 35 – 68 p.



- YARINCIK, K., MURRAY, R. & PETERSON, L. (2000a) 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*, vol. 15 (2), 210 – 228 p.
  
- YARINCIK, K., MURRAY, R., LYONS, T., PETERSON, L. & HAUG, G (2000b) Oxigenation history of bottom waters in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578.000 years: Results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn y Fe). *Paleoceanography*. Vol. 15. No. 6. 593 – 604 p.

# ANEXO 1: Columna litoestratigráfica generalizada para la Formación El Paraíso, quebrada Purureche, estado Falcón



**ANEXO 2:** Fotografías de los afloramientos muestreados en la sección de Purureche, estado Falcón.



**ANEXO 3:** Concentraciones de los elementos mayoritarios expresados en porcentaje de óxidos (%)

| <b>Nombre de la Muestra</b> | <b>CaO (%)</b> | <b>MgO (%)</b> | <b>MnO (%)</b> | <b>SiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>TiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>% Volátiles</b> | <b>Oxidos Total (%)</b> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--|--|--------------------|-------------------------|
| FA-Q-P- 091                 | 0.07           | 0.43           | 0.02           | 54.47                      | 0.77                       | 24.46                                  | 4.45                                   | 8                  | 93                      |
| FA-Q-P- 090                 | 0.40           | 1.07           | 0.04           | 51.47                      | 0.54                       | 16.17                                  | 2.90                                   | 11                 | 84                      |
| FA-Q-P- 089                 | 0.56           | 1.05           | 0.03           | 52.20                      | 0.41                       | 12.73                                  | 1.97                                   | 11                 | 80                      |
| FA-Q-P- 088                 | 0.56           | 1.33           | 0.05           | 52.78                      | 0.47                       | 12.44                                  | 2.52                                   | 12                 | 82                      |
| FA-Q-P- 087                 | 0.79           | 1.58           | 0.07           | 54.01                      | 0.43                       | 18.45                                  | 4.35                                   | 12                 | 92                      |
| FA-Q-P- 083                 | 0.22           | 0.06           | 0.00           | 99.33                      | 0.24                       | 1.17                                   | 0.15                                   | 2                  | 103                     |
| FA-Q-P- 075                 | 0.59           | 0.12           | 0.01           | 74.91                      | 0.24                       | 1.50                                   | 0.19                                   | 2                  | 80                      |
| FA-Q-P- 070                 | 0.07           | 0.30           | 0.00           | 32.27                      | 0.25                       | 32.19                                  | 3.36                                   | 11                 | 80                      |
| FA-Q-P- 068                 | 0.36           | 0.91           | 0.02           | 49.19                      | 0.48                       | 29.88                                  | 3.31                                   | 11                 | 96                      |
| FA-Q-P- 067                 | 0.16           | 0.66           | 0.02           | 37.51                      | 0.22                       | 31.33                                  | 3.68                                   | 12                 | 86                      |
| FA-Q-P- 066                 | 0.07           | 0.57           | 0.01           | 39.74                      | 0.19                       | 31.97                                  | 3.28                                   | 12                 | 88                      |
| FA-Q-P- 065                 | 0.08           | 0.51           | 0.01           | 40.93                      | 0.24                       | 29.06                                  | 3.07                                   | 13                 | 87                      |
| FA-Q-P- 064                 | 0.11           | 0.58           | 0.01           | 50.19                      | 0.62                       | 25.34                                  | 3.78                                   | 11                 | 92                      |
| FA-Q-P- 063                 | 1.19           | 4.73           | 0.38           | 25.94                      | 0.69                       | 3.47                                   | 32.02                                  | 25                 | 94                      |
| FA-Q-P- 062                 | 0.14           | 0.63           | 0.01           | 69.14                      | 0.86                       | 21.60                                  | 2.51                                   | 11                 | 105                     |
| FA-Q-P- 059                 | 0.56           | 0.48           | 0.05           | 95.72                      | 1.06                       | 1.29                                   | 2.25                                   | 3                  | 104                     |
| FA-Q-P- 058                 | 0.27           | 0.34           | 0.04           | 92.75                      | 0.46                       | 1.26                                   | 1.62                                   | 2                  | 99                      |
| FA-Q-P- 056                 | 0.24           | 1.08           | 0.04           | 60.35                      | 0.58                       | 26.62                                  | 3.78                                   | 11                 | 104                     |
| FA-Q-P- 055                 | 0.24           | 1.06           | 0.04           | 64.49                      | 0.83                       | 23.02                                  | 4.19                                   | 10                 | 104                     |
| FA-Q-P- 054                 | 0.46           | 0.68           | 0.01           | 76.11                      | 1.32                       | 14.33                                  | 1.23                                   | 8                  | 102                     |
| FA-Q-P- 053                 | 0.30           | 1.28           | 0.06           | 60.01                      | 0.52                       | 26.26                                  | 4.79                                   | 11                 | 104                     |
| FA-Q-P- 052                 | 0.19           | 0.97           | 0.02           | 65.59                      | 0.68                       | 24.54                                  | 2.87                                   | 10                 | 105                     |
| FA-Q-P- 051                 | 0.13           | 0.47           | 0.01           | 92.34                      | 1.33                       | 7.14                                   | 0.95                                   | 5                  | 107                     |
| FA-Q-P- 043                 | 1.04           | 1.71           | 0.10           | 62.37                      | 0.30                       | 5.90                                   | 9.82                                   | 9                  | 90                      |

**ANEXO 3:** Continuación....Concentraciones de los elementos mayoritarios expresados en porcentaje de óxidos (%)

| <b>Nombre de la Muestra</b> | <b>CaO (%)</b> | <b>MgO (%)</b> | <b>MnO (%)</b> | <b>SiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>TiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>% Volátiles</b> | <b>Oxidos Total (%)</b> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--|--|--------------------|-------------------------|
| FA-Q-P- 042                 | 0.17           | 0.44           | 0.02           | 46.92                      | 0.71                       | 25.68                                  | 3.62                                   | 8                  | 85                      |
| FA-Q-P- 041                 | 0.08           | 0.41           | 0.01           | 36.47                      | 0.32                       | 43.76                                  | 2.66                                   | 10                 | 94                      |
| FA-Q-P- 039                 | 0.33           | 1.06           | 0.05           | 48.94                      | 0.68                       | 42.61                                  | 5.86                                   | 12                 | 112                     |
| FA-Q-P- 038                 | 0.16           | 0.62           | 0.03           | 54.89                      | 0.62                       | 15.52                                  | 4.09                                   | 7                  | 83                      |
| FA-Q-P- 037                 | 0.25           | 0.23           | 0.01           | 92.84                      | 1.00                       | 9.65                                   | 1.48                                   | 4                  | 110                     |
| FA-Q-P- 035                 | 0.34           | 1.07           | 0.05           | 83.15                      | 1.11                       | 12.43                                  | 2.83                                   | 8                  | 109                     |
| FA-Q-P- 034                 | 0.34           | 1.25           | 0.06           | 88.45                      | 1.16                       | 13.18                                  | 3.21                                   | 8                  | 116                     |
| FA-Q-P- 033                 | 0.41           | 1.48           | 0.09           | 88.29                      | 1.11                       | 12.03                                  | 4.40                                   | 8                  | 116                     |
| FA-Q-P- 032                 | 1.60           | 4.24           | 0.33           | 67.74                      | 0.45                       | 1.24                                   | 9.13                                   | 14                 | 99                      |
| FA-Q-P- 031                 | 0.28           | 1.12           | 0.06           | 71.98                      | 0.93                       | 18.59                                  | 4.61                                   | 9                  | 107                     |
| FA-Q-P- 030                 | 0.35           | 1.46           | 0.09           | 63.18                      | 0.80                       | 19.40                                  | 5.93                                   | 11                 | 102                     |
| FA-Q-P- 029                 | 0.37           | 1.66           | 0.11           | 62.10                      | 0.69                       | 19.44                                  | 8.33                                   | 12                 | 105                     |
| FA-Q-P- 028                 | 0.38           | 1.75           | 0.10           | 58.77                      | 0.66                       | 27.71                                  | 12.02                                  | 12                 | 114                     |
| FA-Q-P- 027                 | 0.45           | 1.88           | 0.11           | 56.39                      | 0.61                       | 33.06                                  | 13.46                                  | 12                 | 118                     |
| FA-Q-P- 026                 | 0.43           | 1.76           | 0.10           | 56.23                      | 0.54                       | 14.20                                  | 10.95                                  | 12                 | 97                      |
| FA-Q-P- 025                 | 0.56           | 1.75           | 0.10           | 56.29                      | 0.54                       | 36.99                                  | 12.90                                  | 13                 | 122                     |
| FA-Q-P- 024                 | 0.38           | 1.70           | 0.07           | 56.94                      | 0.53                       | 30.29                                  | 7.96                                   | 12                 | 110                     |
| FA-Q-P- 023                 | 0.31           | 1.67           | 0.09           | 54.64                      | 0.40                       | 33.88                                  | 7.43                                   | 13                 | 112                     |
| FA-Q-P- 022                 | 0.22           | 1.05           | 0.03           | 60.69                      | 0.40                       | 45.27                                  | 6.64                                   | 12                 | 126                     |
| FA-Q-P- 021                 | 0.16           | 0.76           | 0.03           | 51.71                      | 0.33                       | 19.02                                  | 6.28                                   | 12                 | 91                      |
| FA-Q-P- 020                 | 0.15           | 0.93           | 0.02           | 55.70                      | 0.29                       | 40.70                                  | 4.39                                   | 12                 | 115                     |
| FA-Q-P- 019                 | 0.15           | 0.95           | 0.02           | 56.13                      | 0.28                       | 29.36                                  | 4.76                                   | 13                 | 104                     |
| FA-Q-P- 018                 | 5.11           | 3.60           | 0.06           | 63.57                      | 0.42                       | 1.25                                   | 5.45                                   | 14                 | 93                      |
| FA-Q-P- 017                 | 4.13           | 4.88           | 0.18           | 47.07                      | 0.27                       | 2.59                                   | 20.02                                  | 19                 | 98                      |

**ANEXO 3:** Continuación....Concentraciones de los elementos mayoritarios expresados en porcentaje de óxidos (%)

| <b>Nombre de la Muestra</b> | <b>CaO (%)</b> | <b>MgO (%)</b> | <b>MnO (%)</b> | <b>SiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>TiO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b> | <b>% Volátiles</b> | <b>Oxidos Total (%)</b> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--|--|--------------------|-------------------------|
| FA-Q-P- 015                 | 0.19           | 0.58           | 0.00           | 66.84                      | 0.69                       | 29.23                                  | 2.08                                   | 9                  | 109                     |
| FA-Q-P- 014                 | 0.20           | 0.52           | 0.00           | 71.08                      | 0.70                       | 18.81                                  | 1.41                                   | 9                  | 102                     |
| FA-Q-P- 013                 | 0.26           | 1.10           | 0.03           | 58.16                      | 0.54                       | 33.24                                  | 3.92                                   | 11                 | 108                     |
| FA-Q-P- 012                 | 0.18           | 0.80           | 0.01           | 60.62                      | 0.71                       | 34.20                                  | 2.20                                   | 10                 | 109                     |
| FA-Q-P- 011                 | 0.28           | 0.96           | 0.03           | 62.42                      | 0.70                       | 27.85                                  | 6.02                                   | 10                 | 108                     |
| FA-Q-P- 010                 | 0.20           | 0.82           | 0.01           | 60.55                      | 0.61                       | 15.73                                  | 1.05                                   | 10                 | 89                      |
| FA-Q-P- 009                 | 0.24           | 0.77           | 0.01           | 59.22                      | 0.54                       | 23.80                                  | 1.86                                   | 11                 | 97                      |
| FA-Q-P- 008                 | 0.26           | 0.87           | 0.01           | 61.63                      | 0.63                       | 20.92                                  | 1.79                                   | 11                 | 97                      |
| FA-Q-P- 094                 | 0.44           | 0.74           | 0.03           | 40.96                      | 0.39                       | 29.67                                  | 4.88                                   | 11                 | 88                      |
| FA-Q-P- 007                 | 0.41           | 1.22           | 0.06           | 58.65                      | 0.58                       | 22.29                                  | 3.74                                   | 11                 | 98                      |
| FA-Q-P- 006                 | 0.33           | 0.80           | 0.01           | 62.53                      | 0.58                       | 21.66                                  | 1.43                                   | 10                 | 97                      |
| FA-Q-P- 005                 | 0.56           | 1.09           | 0.03           | 62.69                      | 0.63                       | 18.86                                  | 3.37                                   | 11                 | 98                      |
| FA-Q-P- 004                 | 0.29           | 0.74           | 0.01           | 62.43                      | 0.65                       | 24.17                                  | 2.96                                   | 10                 | 101                     |
| FA-Q-P- 003                 | 0.40           | 0.93           | 0.03           | 59.97                      | 0.62                       | 26.33                                  | 2.94                                   | 10                 | 102                     |
| FA-Q-P- 002                 | 0.39           | 0.90           | 0.02           | 59.45                      | 0.57                       | 32.75                                  | 2.86                                   | 11                 | 107                     |
| FA-Q-P- 001                 | 0.42           | 1.03           | 0.04           | 54.72                      | 0.56                       | 24.59                                  | 5.40                                   | 11                 | 98                      |

**ANEXO 4:** Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Al</b> | <b>Ba</b> | <b>C</b> | <b>Ca</b> | <b>Ce</b> | <b>Cr</b> | <b>Cu</b> | <b>Fe</b> | <b>La</b> | <b>Mg</b> | <b>Mn</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 091    | 129437    | 33        | 4191     | 535       | 416       | 84        | 4         | 31131     | 19        | 2621      | 150       |
| FA-Q-P- 090    | 85555     | 70        | 11393    | 2864      | 320       | 87        | 4         | 20302     | 46        | 6446      | 276       |
| FA-Q-P- 089    | 67380     | 97        | 10720    | 4006      | 595       | 94        | 8         | 13749     | 73        | 6309      | 241       |
| FA-Q-P- 088    | 65838     | 91        | 13437    | 3968      | 582       | 92        | 5         | 17658     | 61        | 8013      | 395       |
| FA-Q-P- 087    | 97662     | 115       | 16009    | 5673      | 786       | 107       | 10        | 30429     | 90        | 9543      | 558       |
| FA-Q-P- 083    | 6188      | 32        | 2002     | 1538      | 5         | 2         | 3         | 1065      | 6         | 375       | 14        |
| FA-Q-P- 075    | 7960      | 33        | 1972     | 4242      | 5         | 1         | 4         | 1339      | 6         | 738       | 71        |
| FA-Q-P- 070    | 170378    | 59        | 4703     | 465       | 213       | 92        | 4         | 23484     | 36        | 1799      | 10        |
| FA-Q-P- 068    | 158141    | 86        | 7603     | 2541      | 313       | 88        | 13        | 23125     | 36        | 5466      | 137       |
| FA-Q-P- 067    | 165837    | 89        | 9937     | 1111      | 301       | 88        | 16        | 25756     | 40        | 4002      | 141       |
| FA-Q-P- 066    | 169225    | 96        | 7561     | 470       | 240       | 88        | 13        | 22942     | 43        | 3446      | 48        |
| FA-Q-P- 065    | 153809    | 77        | 7120     | 591       | 304       | 97        | 8         | 21477     | 46        | 3083      | 68        |
| FA-Q-P- 064    | 134116    | 112       | 7834     | 774       | 295       | 137       | 169       | 26419     | 51        | 3508      | 87        |
| FA-Q-P- 063    | 18382     | 10        | 69387    | 8480      | 217       | 51        | 4         | 223920    | 64        | 28553     | 2975      |
| FA-Q-P- 062    | 114343    | 131       | 6431     | 997       | 444       | 209       | 21        | 17529     | 64        | 3773      | 68        |
| FA-Q-P- 059    | 6817      | 33        | 5956     | 4000      | 37        | 28        | 4         | 15763     | 6         | 2886      | 419       |
| FA-Q-P- 058    | 6642      | 32        | 5054     | 1897      | 7         | 26        | 6         | 11360     | 11        | 2078      | 313       |
| FA-Q-P- 056    | 140886    | 175       | 7945     | 1683      | 522       | 195       | 24        | 26464     | 118       | 6498      | 272       |
| FA-Q-P- 055    | 121853    | 160       | 7823     | 1696      | 564       | 248       | 24        | 29309     | 79        | 6417      | 334       |
| FA-Q-P- 054    | 75848     | 133       | 4947     | 3260      | 439       | 191       | 26        | 8614      | 84        | 4099      | 87        |
| FA-Q-P- 053    | 138979    | 175       | 10392    | 2162      | 435       | 187       | 25        | 33479     | 61        | 7691      | 436       |
| FA-Q-P- 052    | 129871    | 162       | 7239     | 1360      | 440       | 197       | 19        | 20042     | 103       | 5822      | 186       |
| FA-Q-P- 051    | 37814     | 33        | 4442     | 920       | 91        | 74        | 14        | 6653      | 12        | 2805      | 100       |
| FA-Q-P- 043    | 31234     | 33        | 23252    | 7437      | 36        | 13        | 4         | 68675     | 194       | 10295     | 792       |
| FA-Q-P- 042    | 135927    | 35        | 8845     | 1232      | 156       | 63        | 8         | 25328     | 24        | 2672      | 156       |

**ANEXO 4:** Continuación...Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Al</b> | <b>Ba</b> | <b>C</b> | <b>Ca</b> | <b>Ce</b> | <b>Cr</b> | <b>Cu</b> | <b>Fe</b> | <b>La</b> | <b>Mg</b> | <b>Mn</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 041    | 231577    | 86        | 5359     | 571       | 231       | 84        | 10        | 18623     | 37        | 2480      | 53        |
| FA-Q-P- 039    | 225526    | 94        | 10637    | 2368      | 208       | 82        | 4         | 40962     | 78        | 6388      | 385       |
| FA-Q-P- 038    | 82152     | 33        | 12919    | 1176      | 84        | 57        | 4         | 28621     | 40        | 3713      | 264       |
| FA-Q-P- 037    | 51065     | 37        | 2852     | 1791      | 75        | 61        | 9         | 10355     | 52        | 1361      | 58        |
| FA-Q-P- 035    | 65812     | 99        | 13369    | 2449      | 191       | 119       | 20        | 19826     | 42        | 6422      | 412       |
| FA-Q-P- 034    | 69734     | 111       | 14289    | 2403      | 305       | 123       | 19        | 22458     | 79        | 7564      | 500       |
| FA-Q-P- 033    | 63663     | 107       | 15870    | 2906      | 258       | 105       | 18        | 30795     | 36        | 8899      | 674       |
| FA-Q-P- 032    | 6562      | 32        | 39472    | 11400     | 53        | 35        | 11        | 63834     | 10        | 25575     | 2586      |
| FA-Q-P- 031    | 98396     | 100       | 15566    | 1998      | 202       | 115       | 19        | 32268     | 34        | 6739      | 480       |
| FA-Q-P- 030    | 102697    | 144       | 16809    | 2521      | 386       | 133       | 25        | 41450     | 79        | 8811      | 689       |
| FA-Q-P- 029    | 102908    | 143       | 19684    | 2675      | 330       | 124       | 30        | 58276     | 60        | 9993      | 819       |
| FA-Q-P- 028    | 146650    | 161       | 19788    | 2744      | 399       | 129       | 25        | 84061     | 54        | 10558     | 793       |
| FA-Q-P- 027    | 174991    | 167       | 20236    | 3220      | 375       | 125       | 20        | 94128     | 52        | 11308     | 842       |
| FA-Q-P- 026    | 75162     | 173       | 18304    | 3047      | 347       | 128       | 22        | 76571     | 54        | 10585     | 765       |
| FA-Q-P- 025    | 195788    | 166       | 19415    | 3994      | 355       | 119       | 27        | 90211     | 270       | 10581     | 800       |
| FA-Q-P- 024    | 160289    | 177       | 14491    | 2749      | 393       | 130       | 23        | 55644     | 302       | 10267     | 546       |
| FA-Q-P- 023    | 179299    | 191       | 16380    | 2205      | 381       | 126       | 22        | 51970     | 65        | 10050     | 682       |
| FA-Q-P- 022    | 239606    | 207       | 6810     | 1556      | 427       | 127       | 18        | 46448     | 62        | 6317      | 240       |
| FA-Q-P- 021    | 100684    | 185       | 6142     | 1142      | 407       | 98        | 22        | 43891     | 66        | 4564      | 234       |
| FA-Q-P- 020    | 215420    | 193       | 5849     | 1059      | 330       | 115       | 25        | 30688     | 59        | 5613      | 158       |
| FA-Q-P- 019    | 155408    | 200       | 6651     | 1058      | 390       | 118       | 24        | 33307     | 71        | 5713      | 121       |
| FA-Q-P- 018    | 6614      | 32        | 36039    | 36498     | 80        | 26        | 8         | 38087     | 6         | 21734     | 495       |
| FA-Q-P- 017    | 13733     | 32        | 52096    | 29519     | 76        | 21        | 6         | 140057    | 79        | 29425     | 1366      |
| FA-Q-P- 015    | 154708    | 175       | 5169     | 1382      | 391       | 142       | 24        | 14530     | 110       | 3516      | 26        |
| FA-Q-P- 014    | 99571     | 168       | 3756     | 1412      | 386       | 139       | 23        | 9865      | 202       | 3111      | 14        |



**ANEXO 4:** Continuación...Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Al</b> | <b>Ba</b> | <b>C</b> | <b>Ca</b> | <b>Ce</b> | <b>Cr</b> | <b>Cu</b> | <b>Fe</b> | <b>La</b> | <b>Mg</b> | <b>Mn</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 013    | 175906    | 204       | 8676     | 1835      | 473       | 149       | 37        | 27444     | 72        | 6627      | 217       |
| FA-Q-P- 012    | 180983    | 214       | 5500     | 1286      | 513       | 175       | 30        | 15360     | 82        | 4836      | 94        |
| FA-Q-P- 011    | 147421    | 184       | 7798     | 2009      | 487       | 164       | 21        | 42084     | 93        | 5790      | 200       |
| FA-Q-P- 010    | 83274     | 215       | 5714     | 1454      | 533       | 170       | 27        | 7345      | 82        | 4946      | 65        |
| FA-Q-P- 009    | 125985    | 237       | 5734     | 1727      | 562       | 168       | 26        | 12977     | 83        | 4673      | 48        |
| FA-Q-P- 008    | 110694    | 230       | 6040     | 1858      | 496       | 180       | 29        | 12551     | 120       | 5222      | 81        |
| FA-Q-P- 094    | 157008    | 32        | 13093    | 3123      | 376       | 94        | 4         | 34157     | 123       | 4465      | 254       |
| FA-Q-P- 007    | 117948    | 247       | 12357    | 2915      | 566       | 169       | 46        | 26133     | 98        | 7376      | 445       |
| FA-Q-P- 006    | 114633    | 234       | 6807     | 2337      | 546       | 175       | 28        | 9976      | 87        | 4821      | 88        |
| FA-Q-P- 005    | 99799     | 258       | 9156     | 4000      | 589       | 167       | 28        | 23582     | 87        | 6566      | 264       |
| FA-Q-P- 004    | 127921    | 261       | 5562     | 2055      | 584       | 174       | 33        | 20674     | 120       | 4486      | 62        |
| FA-Q-P- 003    | 139374    | 265       | 7982     | 2857      | 590       | 157       | 32        | 20531     | 104       | 5580      | 199       |
| FA-Q-P- 002    | 173348    | 279       | 9099     | 2794      | 601       | 157       | 31        | 20001     | 90        | 5436      | 186       |
| FA-Q-P- 001    | 130120    | 263       | 9767     | 2966      | 581       | 146       | 333       | 37753     | 90        | 6219      | 285       |

**ANEXO 4:** Continuación...Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Ni</b> | <b>Pb</b> | <b>S</b> | <b>Sc</b> | <b>Si</b> | <b>Sr</b> | <b>Ti</b> | <b>V</b> | <b>Y</b> | <b>Zn</b> | <b>Zr</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 091    | 10        | 155       | 2150     | 10        | 254638    | 123       | 4608      | 102      | 18       | 93        | 278       |
| FA-Q-P- 090    | 26        | 170       | 4920     | 14        | 240597    | 83        | 3231      | 124      | 20       | 123       | 159       |
| FA-Q-P- 089    | 36        | 201       | 5620     | 15        | 244003    | 69        | 2469      | 144      | 21       | 123       | 166       |
| FA-Q-P- 088    | 25        | 184       | 4900     | 17        | 246720    | 94        | 2841      | 141      | 20       | 119       | 153       |
| FA-Q-P- 087    | 33        | 213       | 4620     | 20        | 252477    | 102       | 2550      | 168      | 28       | 163       | 153       |
| FA-Q-P- 083    | 431       | 4         | 661      | 0         | 464323    | 15        | 1418      | 2        | 0        | 8         | 8         |
| FA-Q-P- 075    | 4         | 5         | 689      | 0         | 350178    | 15        | 1440      | 8        | 5        | 10        | 50        |
| FA-Q-P- 070    | 12        | 131       | 13300    | 6         | 150822    | 215       | 1479      | 74       | 10       | 88        | 81        |
| FA-Q-P- 068    | 20        | 127       | 7470     | 9         | 229926    | 183       | 2860      | 98       | 16       | 130       | 77        |
| FA-Q-P- 067    | 23        | 127       | 7470     | 9         | 175322    | 168       | 1289      | 97       | 14       | 158       | 78        |
| FA-Q-P- 066    | 28        | 126       | 14600    | 9         | 185769    | 171       | 1150      | 114      | 16       | 130       | 74        |
| FA-Q-P- 065    | 32        | 136       | 14700    | 9         | 191322    | 156       | 1441      | 111      | 16       | 185       | 94        |
| FA-Q-P- 064    | 398       | 192       | 15500    | 10        | 234626    | 168       | 3722      | 113      | 17       | 148       | 210       |
| FA-Q-P- 063    | 47        | 62        | 3530     | 19        | 121252    | 42        | 4136      | 111      | 19       | 132       | 234       |
| FA-Q-P- 062    | 53        | 273       | 16600    | 10        | 323199    | 160       | 5139      | 138      | 23       | 198       | 280       |
| FA-Q-P- 059    | 10        | 42        | 615      | 2         | 447460    | 10        | 6338      | 26       | 12       | 119       | 201       |
| FA-Q-P- 058    | 11        | 36        | 496      | 2         | 433554    | 15        | 2751      | 22       | 8        | 108       | 165       |
| FA-Q-P- 056    | 60        | 258       | 11700    | 14        | 282094    | 162       | 3478      | 163      | 25       | 276       | 194       |
| FA-Q-P- 055    | 56        | 348       | 12300    | 15        | 301464    | 162       | 4988      | 168      | 35       | 188       | 283       |
| FA-Q-P- 054    | 42        | 271       | 7390     | 11        | 355766    | 106       | 7909      | 129      | 22       | 233       | 319       |
| FA-Q-P- 053    | 74        | 266       | 9120     | 14        | 280526    | 152       | 3118      | 161      | 23       | 205       | 191       |
| FA-Q-P- 052    | 49        | 291       | 7940     | 16        | 306589    | 162       | 4075      | 171      | 26       | 228       | 229       |
| FA-Q-P- 051    | 18        | 110       | 1930     | 4         | 431641    | 29        | 7999      | 61       | 11       | 146       | 358       |
| FA-Q-P- 043    | 14        | 18        | 1010     | 7         | 291526    | 17        | 1813      | 39       | 5        | 120       | 52        |
| FA-Q-P- 042    | 13        | 99        | 3740     | 5         | 219327    | 95        | 4239      | 55       | 13       | 106       | 219       |

**ANEXO 4:** Continuación...Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Ni</b> | <b>Pb</b> | <b>S</b> | <b>Sc</b> | <b>Si</b> | <b>Sr</b> | <b>Ti</b> | <b>V</b> | <b>Y</b> | <b>Zn</b> | <b>Zr</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 041    | 14        | 128       | 7160     | 7         | 170465    | 174       | 1933      | 83       | 12       | 92        | 127       |
| FA-Q-P- 039    | 11        | 138       | 13500    | 10        | 228755    | 157       | 4095      | 102      | 15       | 122       | 119       |
| FA-Q-P- 038    | 15        | 88        | 2760     | 4         | 256583    | 57        | 3733      | 50       | 10       | 76        | 193       |
| FA-Q-P- 037    | 29        | 93        | 7530     | 2         | 433956    | 21        | 5974      | 44       | 9        | 85        | 324       |
| FA-Q-P- 035    | 47        | 178       | 3420     | 9         | 388698    | 43        | 6667      | 111      | 19       | 172       | 349       |
| FA-Q-P- 034    | 53        | 199       | 3120     | 11        | 413441    | 39        | 6938      | 122      | 23       | 171       | 361       |
| FA-Q-P- 033    | 51        | 180       | 2870     | 11        | 412730    | 37        | 6669      | 106      | 21       | 172       | 340       |
| FA-Q-P- 032    | 26        | 54        | 1100     | 11        | 316647    | 15        | 2677      | 95       | 19       | 212       | 145       |
| FA-Q-P- 031    | 46        | 178       | 3590     | 11        | 336489    | 73        | 5602      | 118      | 19       | 161       | 295       |
| FA-Q-P- 030    | 54        | 194       | 3740     | 14        | 295309    | 103       | 4770      | 151      | 22       | 199       | 253       |
| FA-Q-P- 029    | 183       | 190       | 3310     | 15        | 290307    | 69        | 4158      | 148      | 22       | 188       | 228       |
| FA-Q-P- 028    | 50        | 203       | 3710     | 17        | 274695    | 150       | 3958      | 156      | 24       | 178       | 212       |
| FA-Q-P- 027    | 52        | 189       | 3370     | 17        | 263588    | 70        | 3645      | 153      | 23       | 182       | 194       |
| FA-Q-P- 026    | 54        | 191       | 3700     | 16        | 262824    | 55        | 3258      | 158      | 23       | 233       | 182       |
| FA-Q-P- 025    | 57        | 190       | 4230     | 18        | 263107    | 147       | 3256      | 156      | 22       | 199       | 179       |
| FA-Q-P- 024    | 49        | 201       | 3790     | 15        | 266177    | 160       | 3151      | 159      | 21       | 272       | 168       |
| FA-Q-P- 023    | 49        | 190       | 7560     | 18        | 255399    | 94        | 2413      | 164      | 19       | 164       | 138       |
| FA-Q-P- 022    | 51        | 194       | 19100    | 15        | 283678    | 50        | 2413      | 157      | 17       | 193       | 135       |
| FA-Q-P- 021    | 62        | 160       | 20200    | 14        | 241694    | 79        | 1963      | 138      | 15       | 200       | 100       |
| FA-Q-P- 020    | 51        | 171       | 20100    | 14        | 260379    | 51        | 1763      | 151      | 13       | 184       | 99        |
| FA-Q-P- 019    | 54        | 173       | 17400    | 14        | 262360    | 68        | 1702      | 150      | 16       | 231       | 101       |
| FA-Q-P- 018    | 14        | 42        | 1800     | 5         | 297144    | 17        | 2540      | 57       | 11       | 150       | 128       |
| FA-Q-P- 017    | 20        | 32        | 2250     | 10        | 220040    | 19        | 1640      | 122      | 20       | 188       | 87        |
| FA-Q-P- 015    | 39        | 225       | 8070     | 11        | 312449    | 65        | 4164      | 146      | 17       | 146       | 224       |
| FA-Q-P- 014    | 34        | 219       | 6330     | 12        | 332252    | 75        | 4197      | 140      | 16       | 116       | 222       |

**ANEXO 4:** Continuación...Concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas determinados en roca ( $\mu\text{g/g}$ )

| <b>Muestra</b> | <b>Ni</b> | <b>Pb</b> | <b>S</b> | <b>Sc</b> | <b>Si</b> | <b>Sr</b> | <b>Ti</b> | <b>V</b> | <b>Y</b> | <b>Zn</b> | <b>Zr</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| FA-Q-P- 013    | 53        | 243       | 3410     | 17        | 271860    | 219       | 3213      | 160      | 20       | 151       | 171       |
| FA-Q-P- 012    | 48        | 283       | 7550     | 15        | 283351    | 186       | 4227      | 158      | 27       | 168       | 230       |
| FA-Q-P- 011    | 434       | 278       | 10800    | 13        | 291792    | 112       | 4207      | 144      | 26       | 136       | 220       |
| FA-Q-P- 010    | 38        | 290       | 6070     | 13        | 283023    | 158       | 3643      | 168      | 22       | 132       | 196       |
| FA-Q-P- 009    | 46        | 295       | 12600    | 13        | 276827    | 193       | 3228      | 163      | 23       | 141       | 170       |
| FA-Q-P- 008    | 46        | 302       | 9980     | 15        | 288077    | 163       | 3770      | 171      | 28       | 179       | 204       |
| FA-Q-P- 094    | 4         | 182       | 4960     | 14        | 191488    | 190       | 2363      | 115      | 23       | 82        | 133       |
| FA-Q-P- 007    | 168       | 283       | 7120     | 19        | 274158    | 166       | 3495      | 177      | 25       | 201       | 184       |
| FA-Q-P- 006    | 43        | 297       | 5460     | 14        | 292316    | 265       | 3469      | 163      | 26       | 173       | 202       |
| FA-Q-P- 005    | 55        | 279       | 8440     | 16        | 293019    | 204       | 3759      | 172      | 28       | 213       | 206       |
| FA-Q-P- 004    | 57        | 297       | 13700    | 15        | 291842    | 177       | 3895      | 172      | 27       | 181       | 202       |
| FA-Q-P- 003    | 49        | 280       | 10800    | 17        | 280347    | 326       | 3689      | 171      | 29       | 210       | 194       |
| FA-Q-P- 002    | 51        | 297       | 13100    | 16        | 277917    | 322       | 3398      | 176      | 29       | 146       | 176       |
| FA-Q-P- 001    | 390       | 281       | 11000    | 18        | 255770    | 200       | 3358      | 177      | 28       | 161       | 179       |

**ANEXO 5:** Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso con respecto a la lutita promedio mundial reportada por Turekian y Wedepohl (1961) y la PAAS (2002)

| <b>Concentraciones Elementales Promedios Lutitas (<math>\mu\text{g/g}</math>)</b> |                                     |                                   |             |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| <b>Elementos</b>  | <b>Lutitas Formación El Paraíso</b> | <b>Turekian y Wedepohl (1961)</b> | <b>PAAS</b> |
| Al  | 134267                              | 80000                             | 100027      |
| Ba  | 154                                 | 580                               | 650         |
| C   | 9979                                | <b>N.R</b>                        | <b>N.R</b>  |
| Ca  | 2069                                | 22100                             | 9291        |
| Ce  | 401                                 | 59                                | 80          |
| Cr  | 133                                 | 90                                | 110         |
| Cu  | 29                                  | 45                                | <b>N.R</b>  |
| Fe  | 31192                               | 47200                             | 44063       |
| La  | 80                                  | 92                                | 38          |
| Mg  | 5998                                | 15000                             | 13267       |
| Mn  | 290                                 | 850                               | 852         |
| Ni  | 68                                  | 68                                | 55          |
| S   | 8566                                | 2400                              | <b>N.R</b>  |
| Sc  | 13                                  | 13                                | 16          |
| Si  | 272036                              | 73000                             | 293556      |
| Sr  | 137                                 | 300                               | 200         |
| Ti  | 3619                                | 4600                              | 5993        |
| V   | 139                                 | 130                               | <b>N.R</b>  |
| Y   | 21                                  | 26                                | 27          |
| Zn  | 166                                 | 95                                | <b>N.R</b>  |
| Zr  | 192                                 | 160                               | 210         |

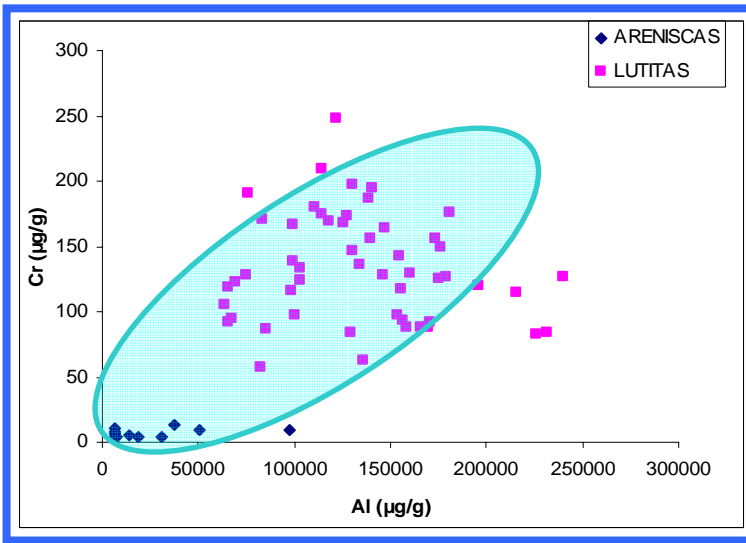
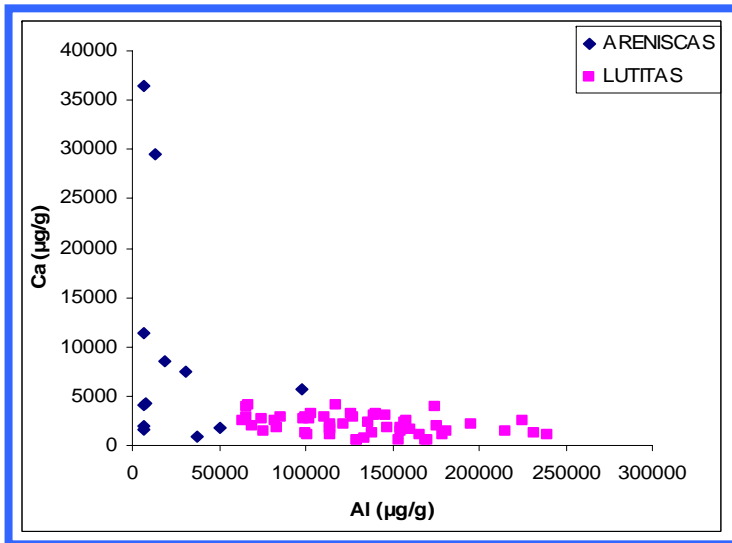
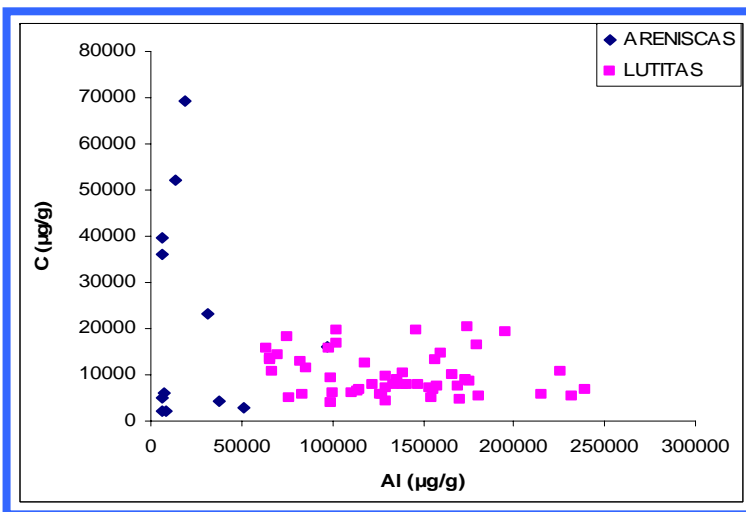
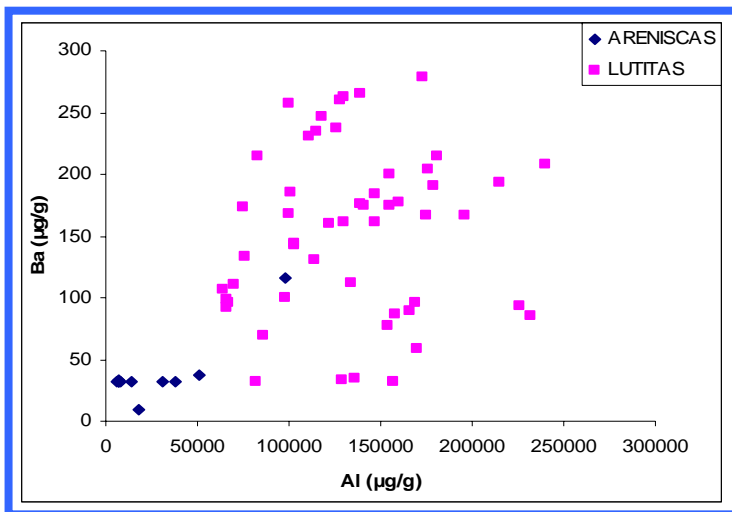
**N.R. = No Reportado.**

**ANEXO 6:** Comparación de las concentraciones promedios para las lutitas de la Formación El Paraíso con respecto a las lutitas de la Formación Pecaya.  
Méndez (2006)

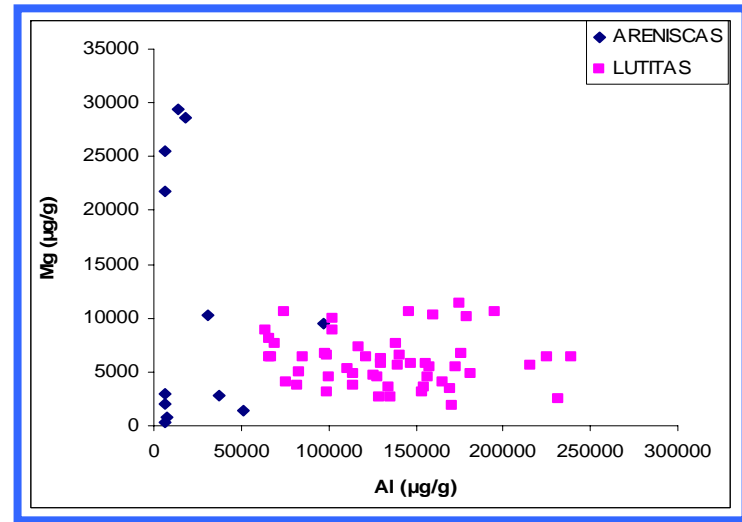
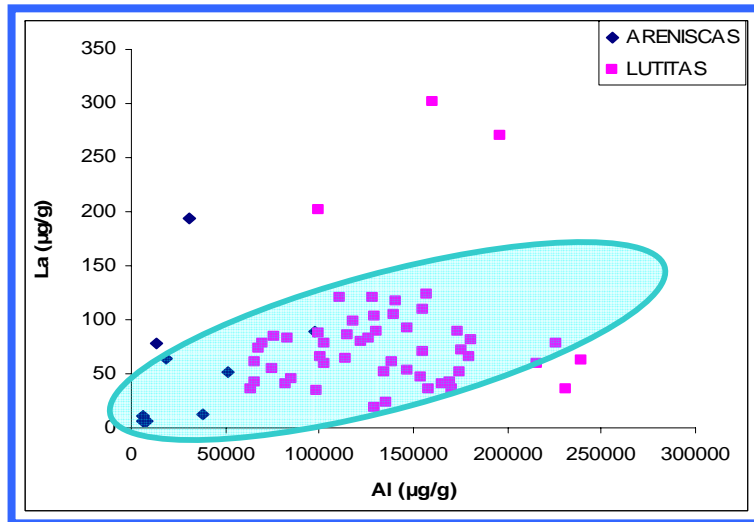
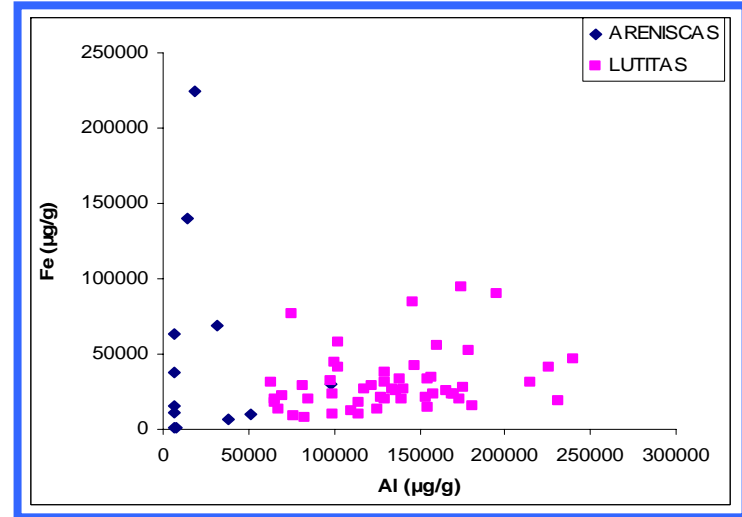
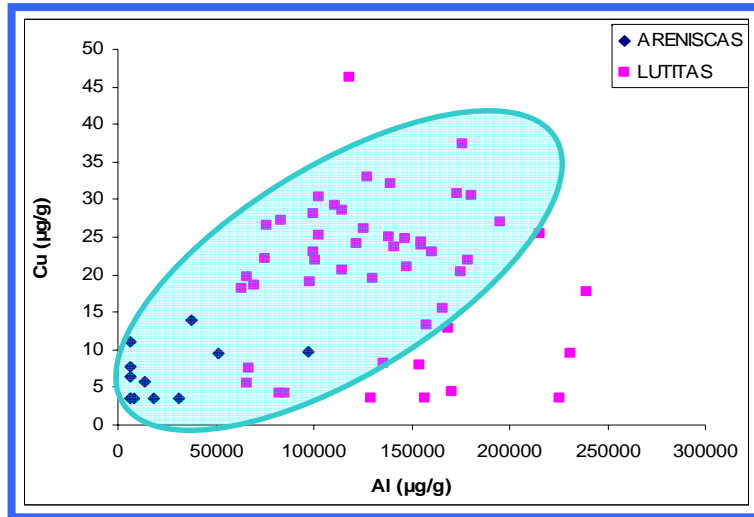
| <b>Concentraciones Elementales Promedios Lutitas (<math>\mu\text{g/g}</math>)</b> |                                     |                                 |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Elementos</b>  | <b>Lutitas Formación El Paraíso</b> | <b>Lutitas Formación Pecaya</b> |
| Al  | 134267                              | 93383                           |
| Ba  | 154                                 | 306                             |
| C   | 9979                                | <b>N.R</b>                      |
| Ca  | 2069                                | 17946                           |
| Ce  | 401                                 | 186                             |
| Cr  | 133                                 | 125                             |
| Cu  | 29                                  | 27                              |
| Fe  | 31192                               | 45950                           |
| La  | 80                                  | 24                              |
| Mg  | 5998                                | 8260                            |
| Mn  | 290                                 | 195                             |
| Ni  | 68                                  | 46                              |
| S   | 8566                                | <b>N.R</b>                      |
| Sc  | 13                                  | 17                              |
| Si  | 272036                              | 266125                          |
| Sr  | 137                                 | 548                             |
| Ti  | 3619                                | 4754                            |
| V   | 139                                 | 186                             |
| Y   | 21                                  | 28                              |
| Zn  | 166                                 | 196                             |
| Zr  | 192                                 | 195                             |

**N.R. = No Reportado.**

**ANEXO 7:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Ba, C, Ca y Cr con respecto al Al.

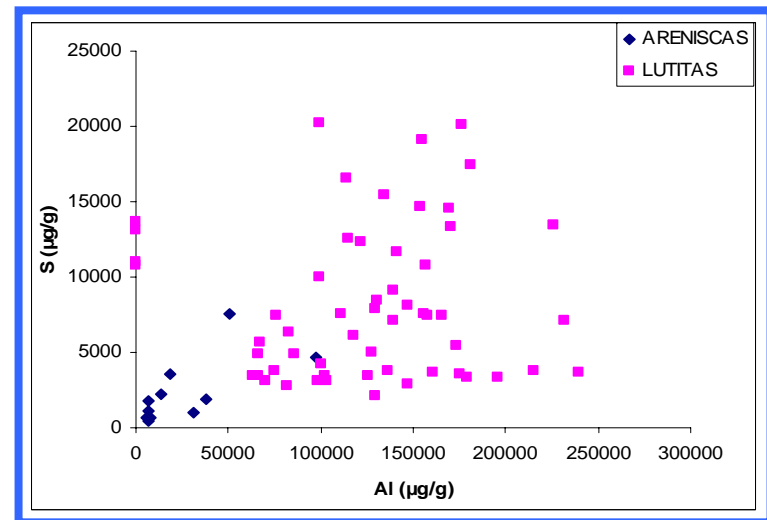
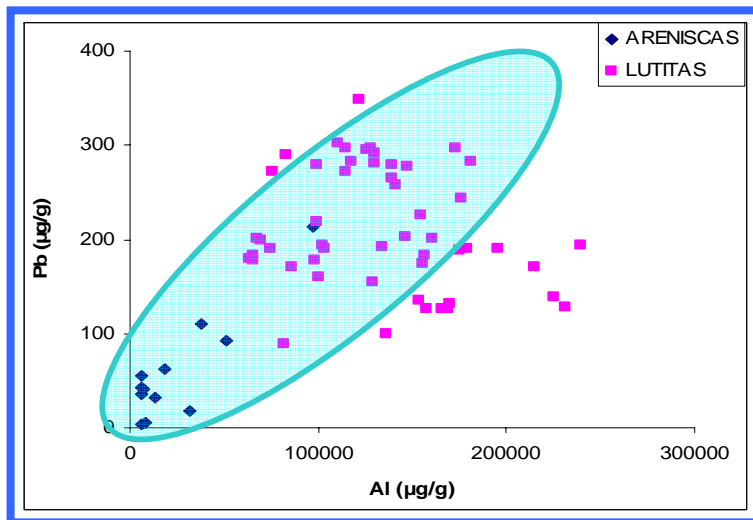
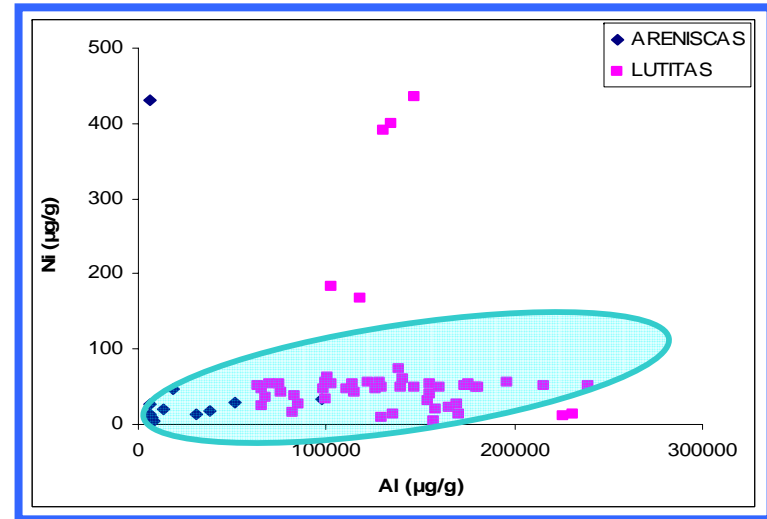
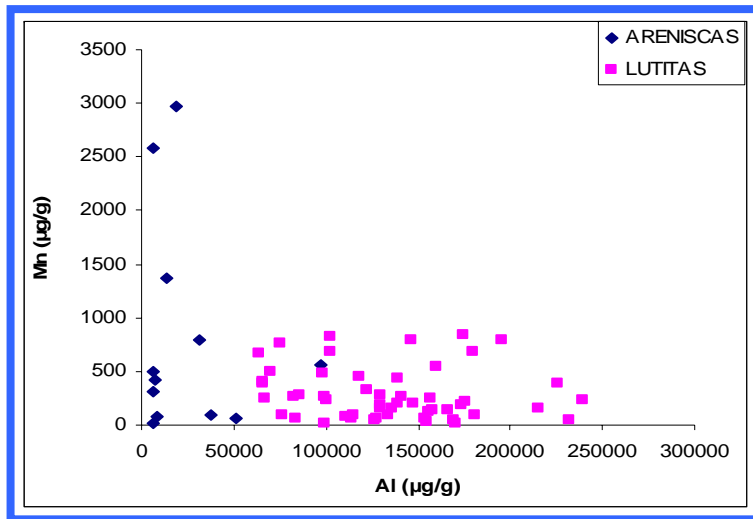


**ANEXO 8:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Cu, Fe, La y Mg con respecto al Al.

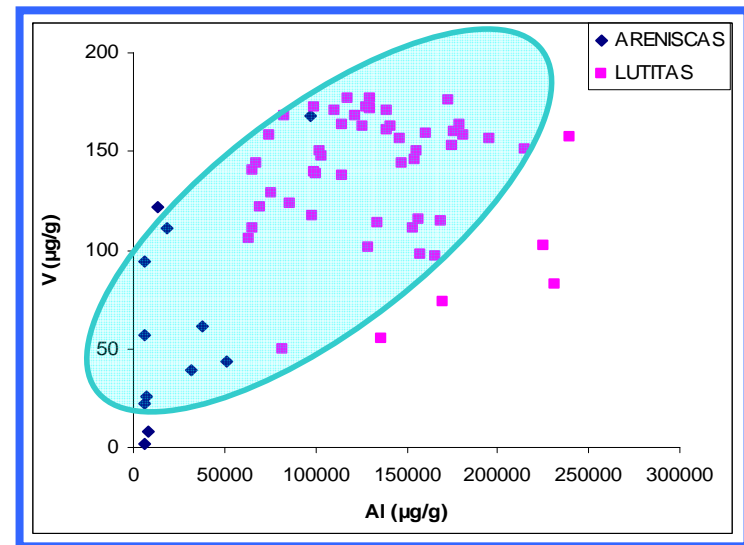
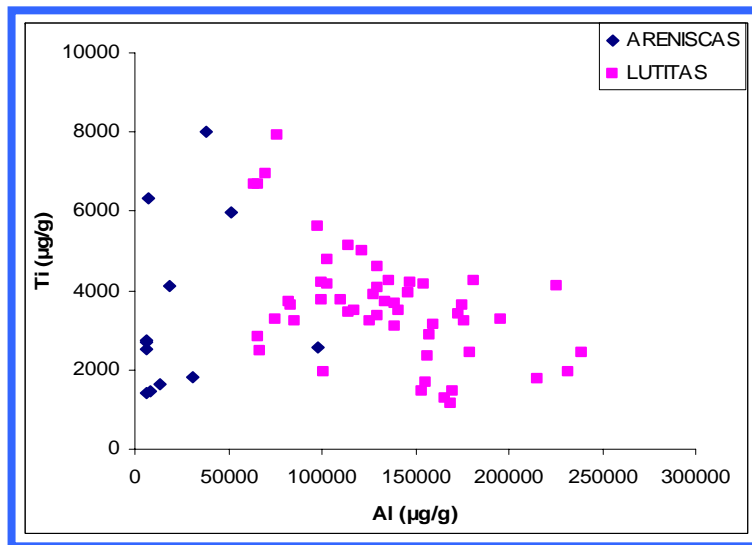
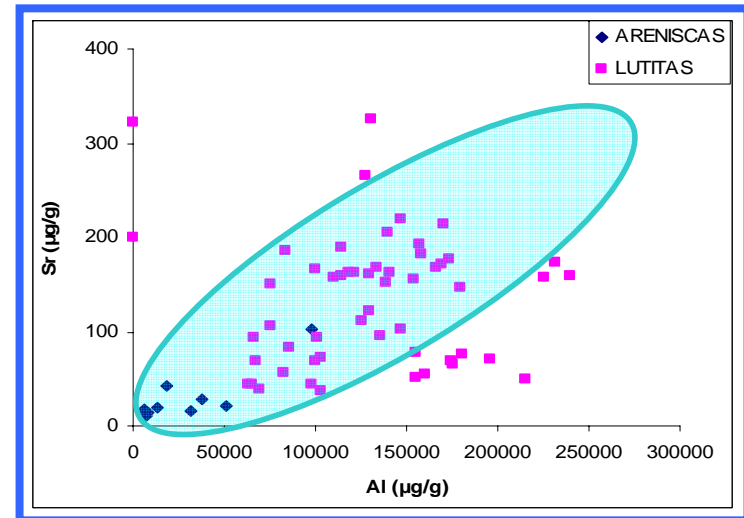
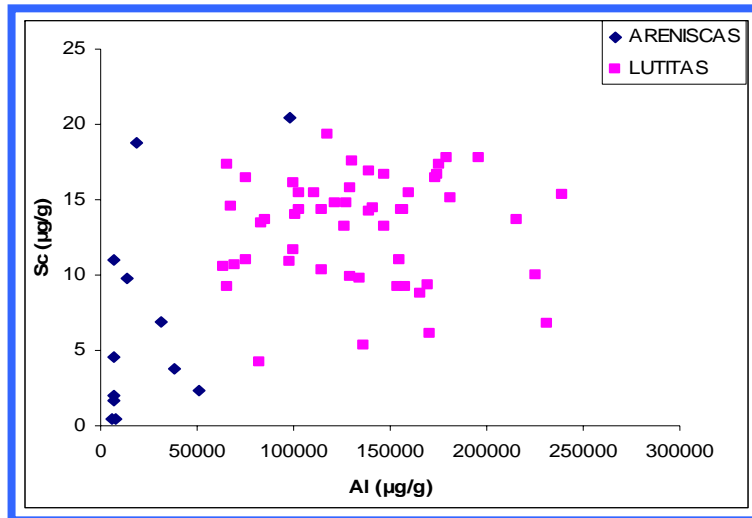




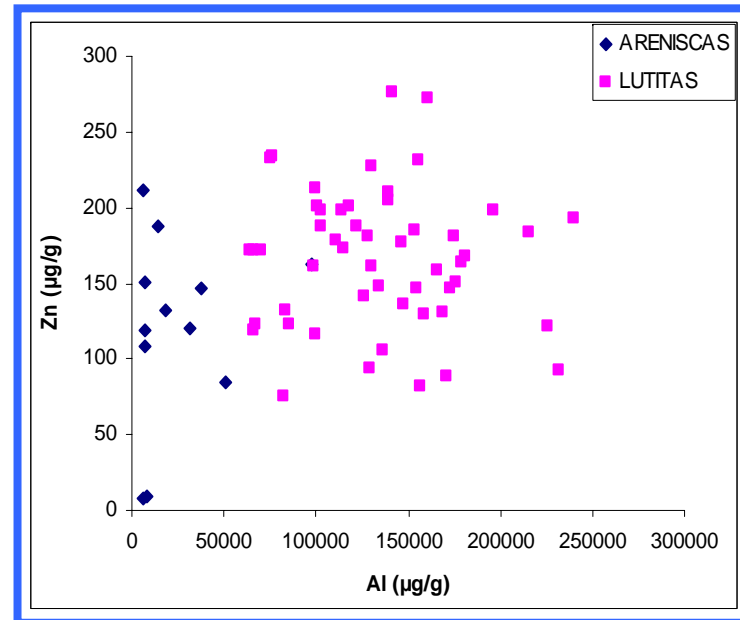
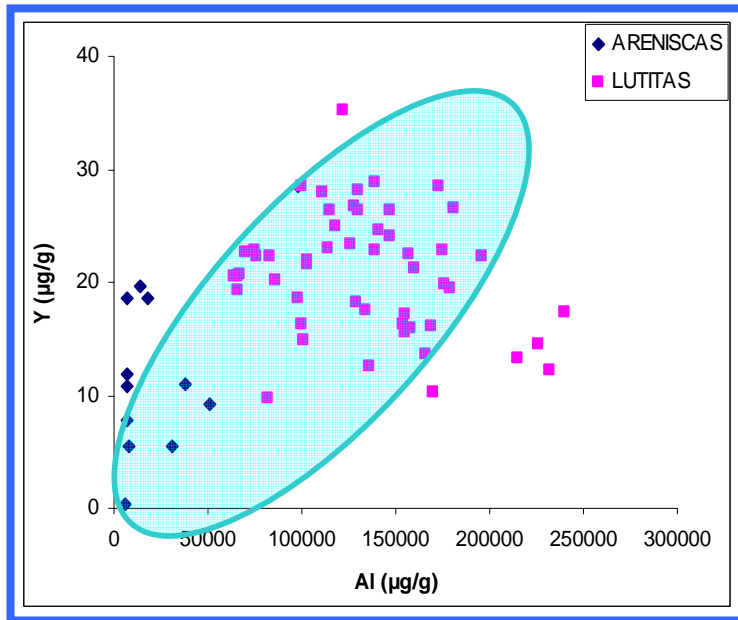
**ANEXO 9:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Mn, Ni, Pb y S con respecto al Al.



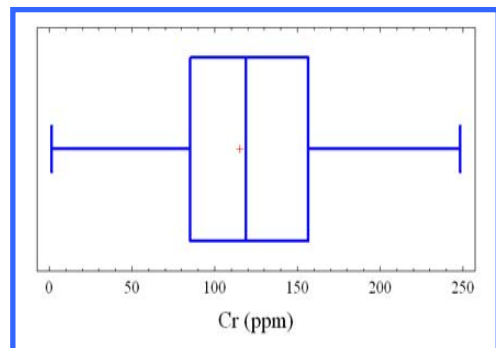
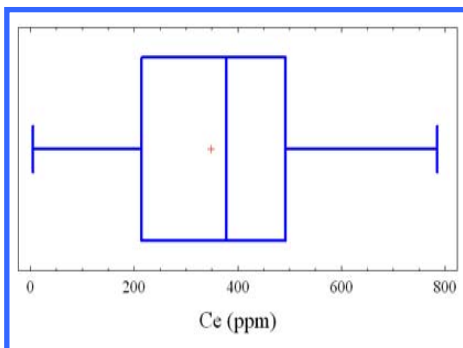
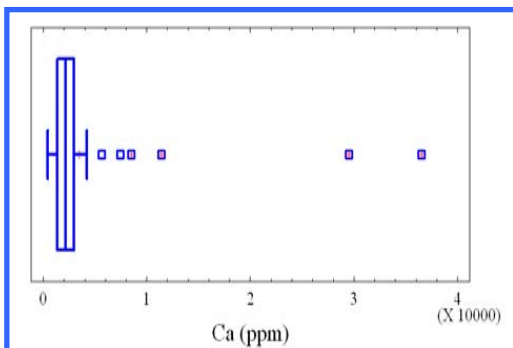
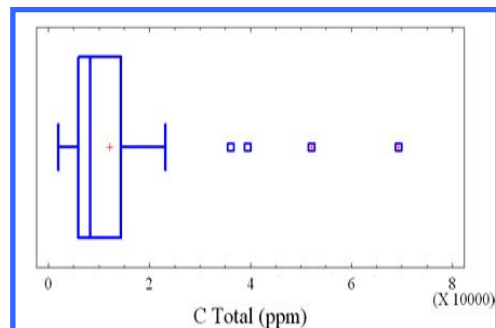
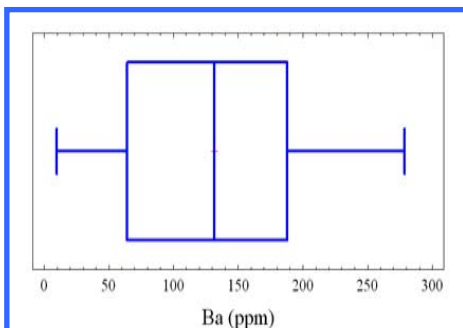
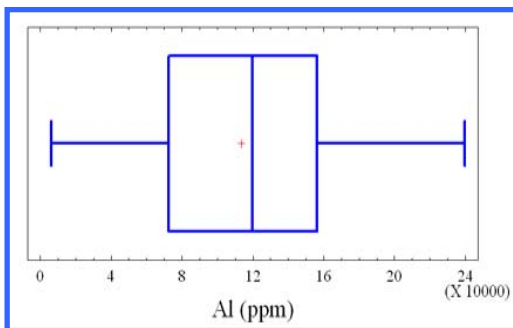
**ANEXO 10:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Sc, Sr, Ti y V con respecto al Al.



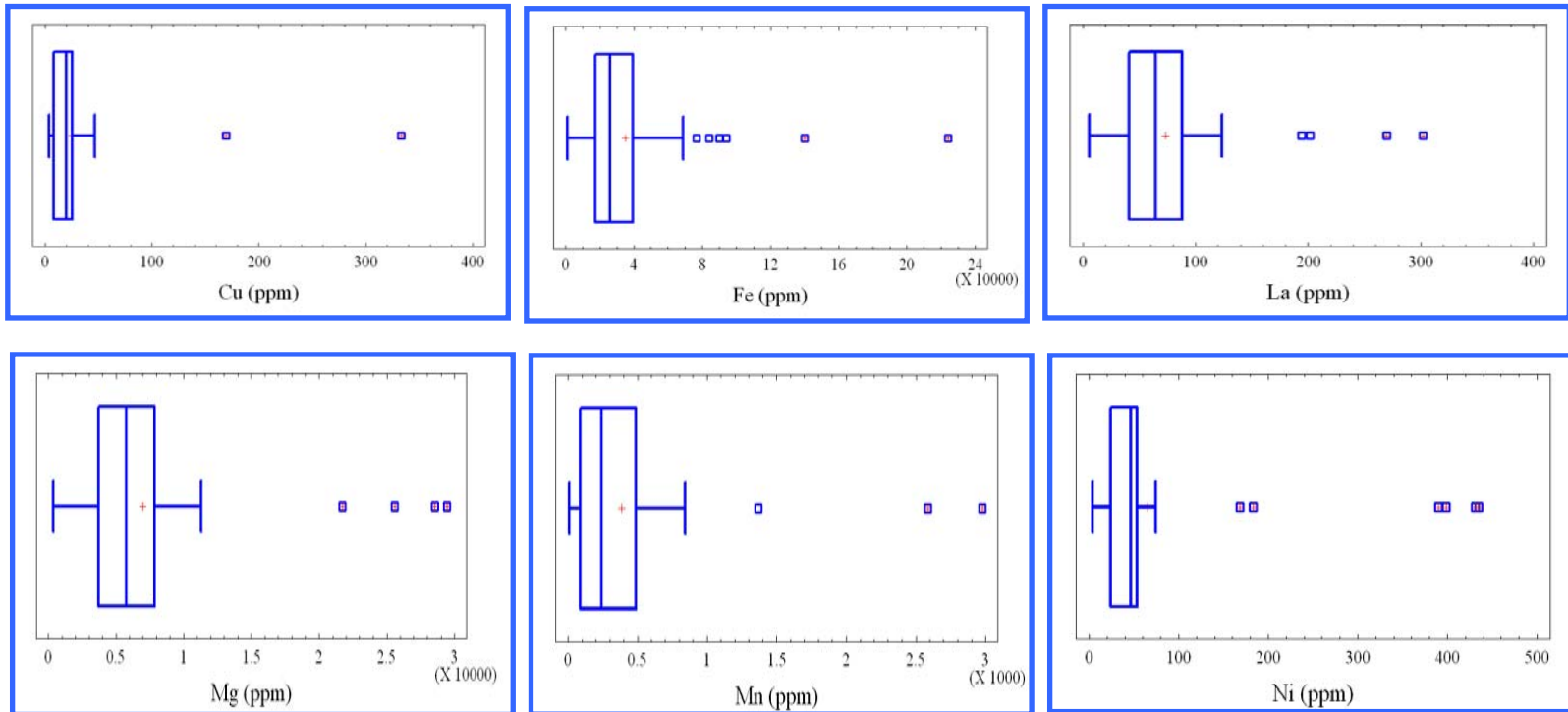
**ANEXO 11:** Gráficos de dispersión. Comportamiento de los elementos Y y Zn con respecto al Al.



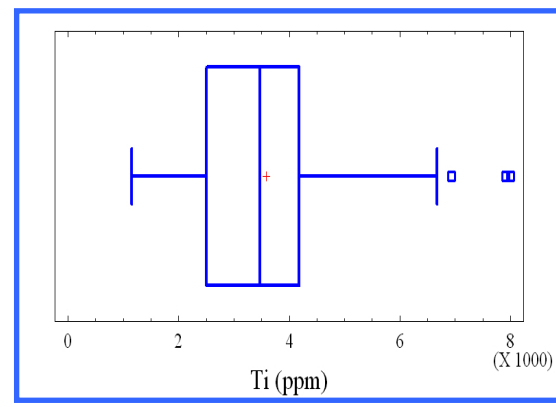
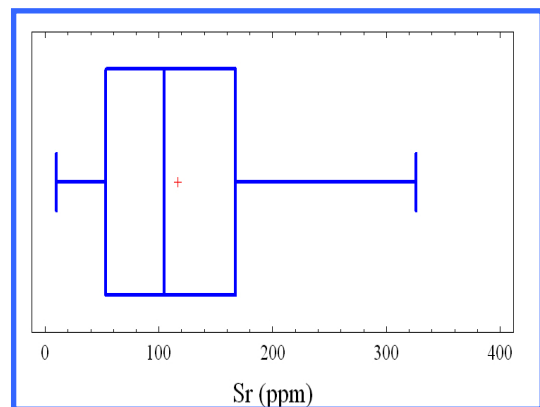
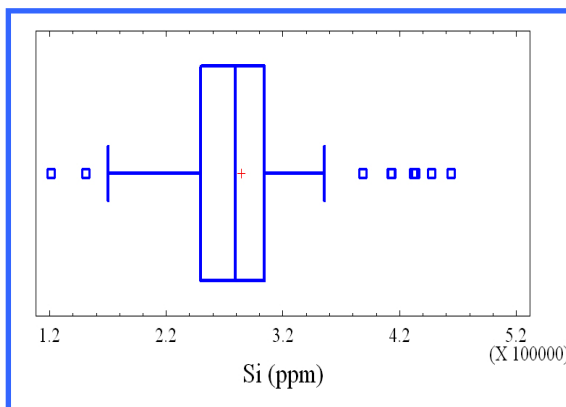
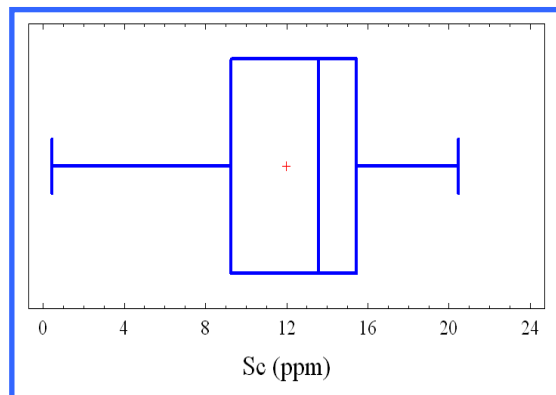
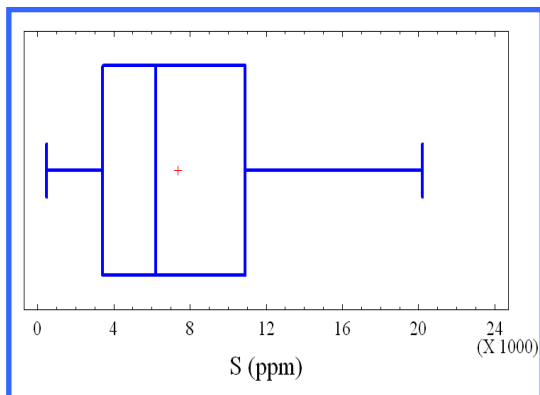
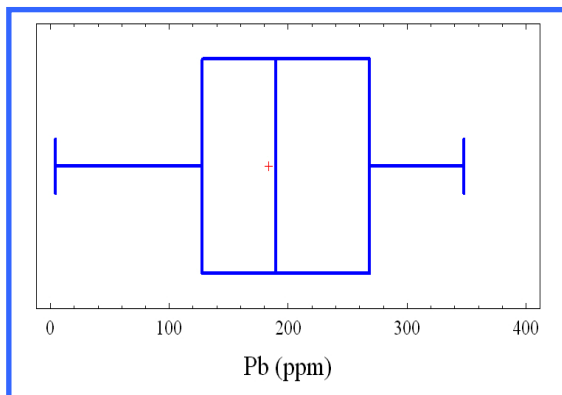
**ANEXO 12:** Cajas gráficas para los elementos Al, Ba, C, Ca, Ce y Cr.



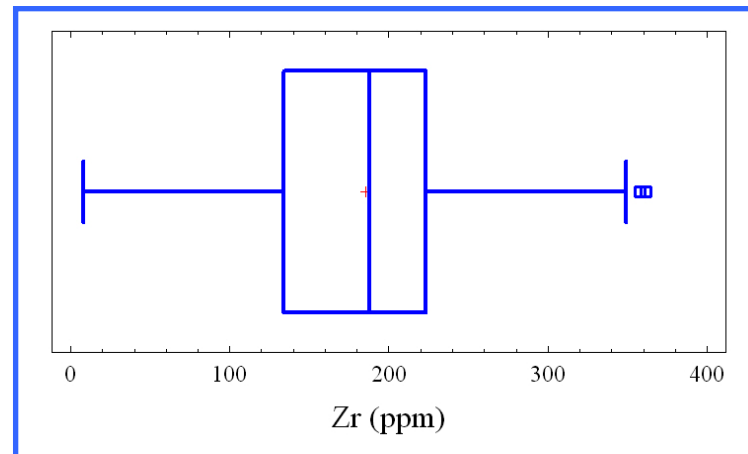
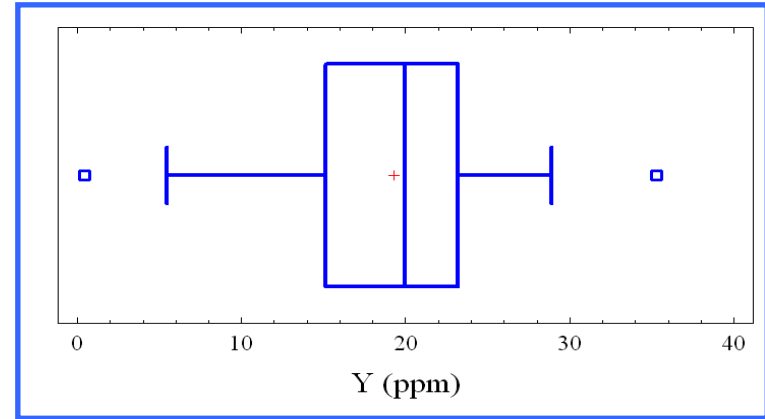
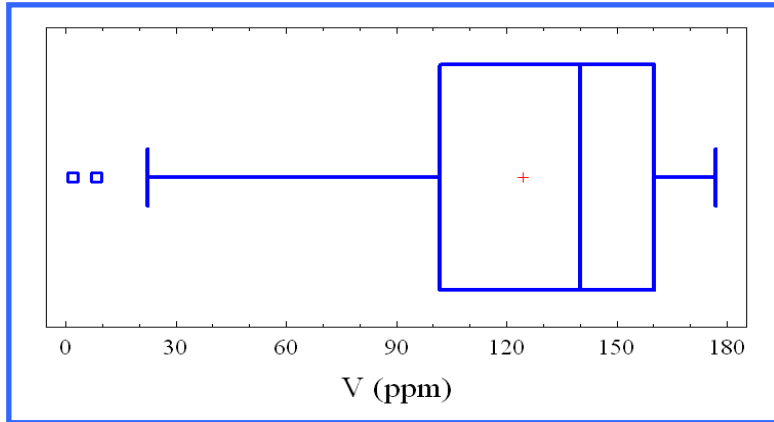
**ANEXO 13:** Cajas gráficas para los elementos Cu, Fe, La, Mg, Mn y Ni.



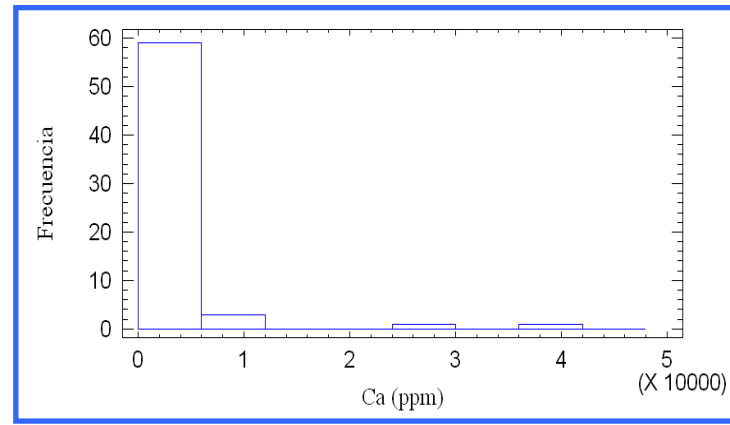
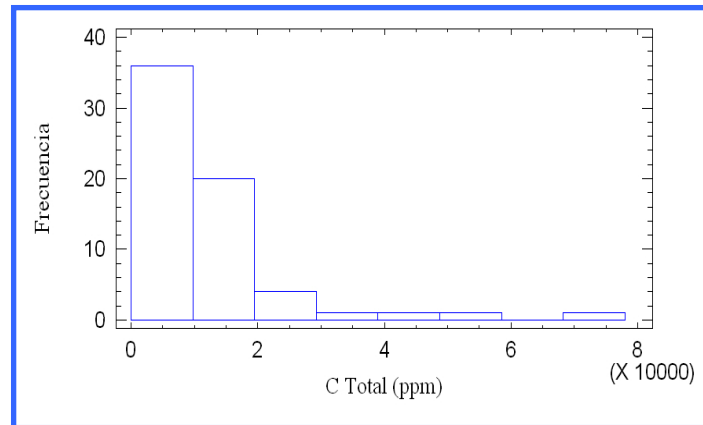
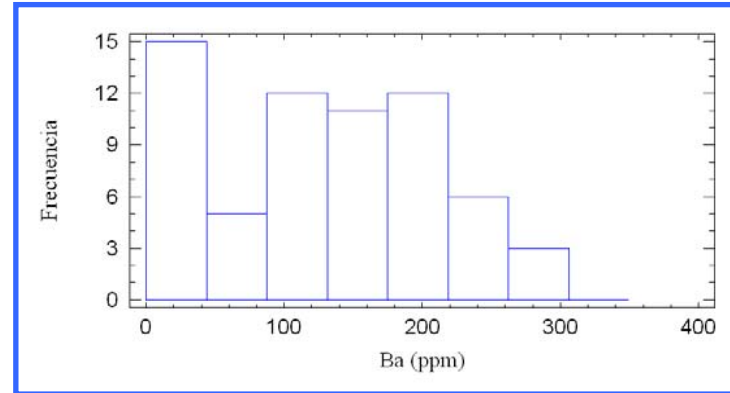
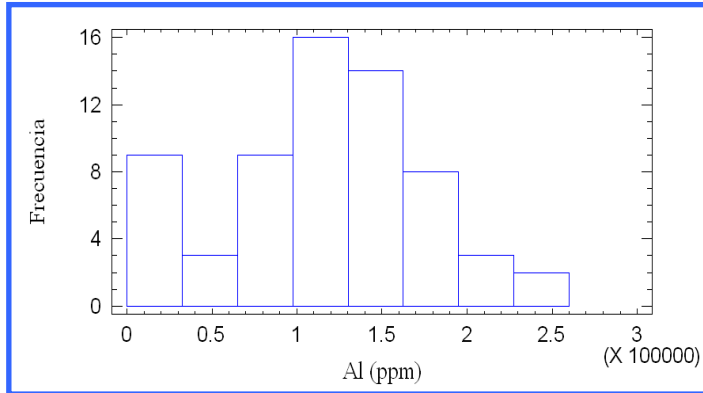
**ANEXO 14:** Cajas gráficas para los elementos Pb, S, Sc, Si, Sr y Ti.



**ANEXO 15:** Cajas gráficas para los elementos V, Y y Zr.

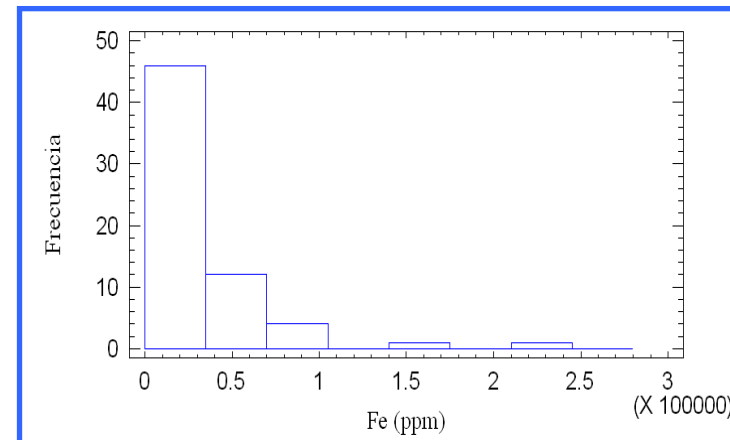
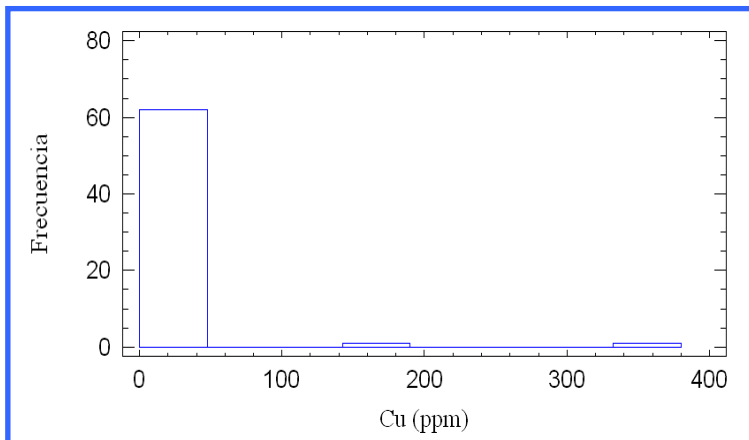
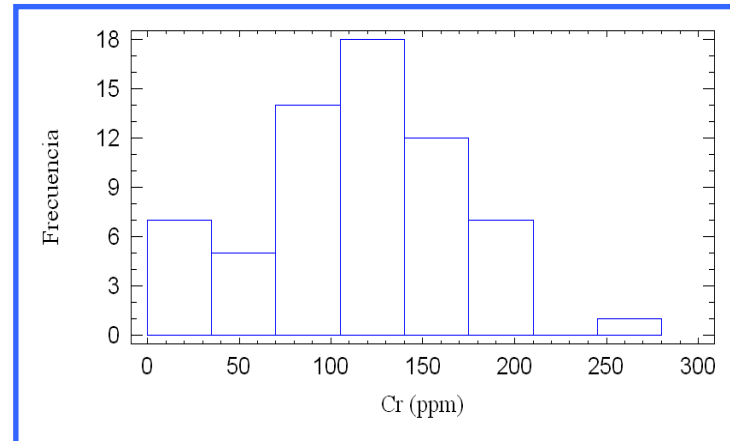
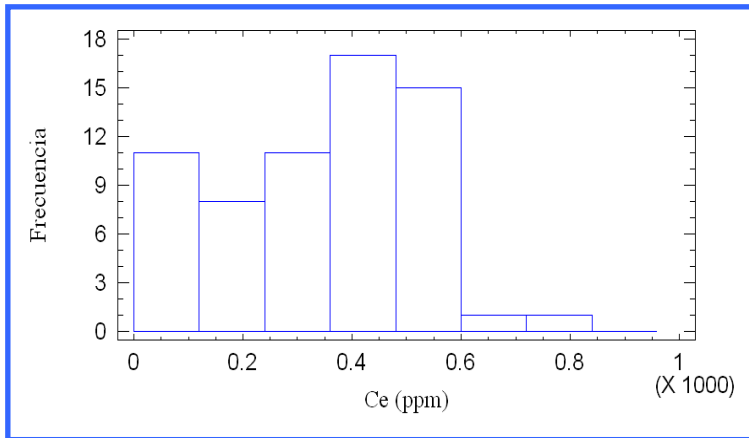


**ANEXO 16:** Histogramas de frecuencia para los elementos Al, Ba, C y Ca.

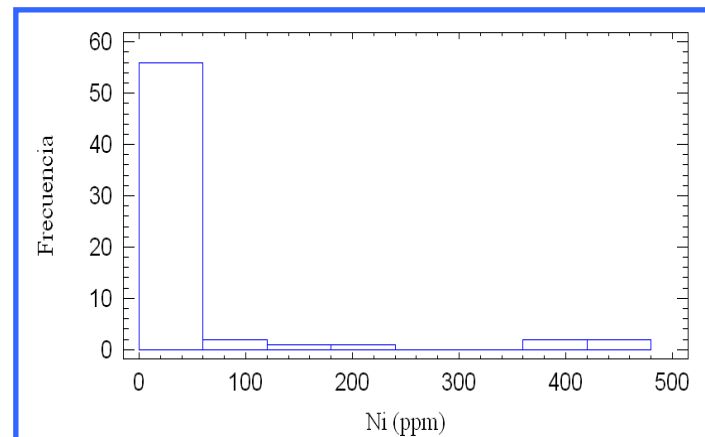
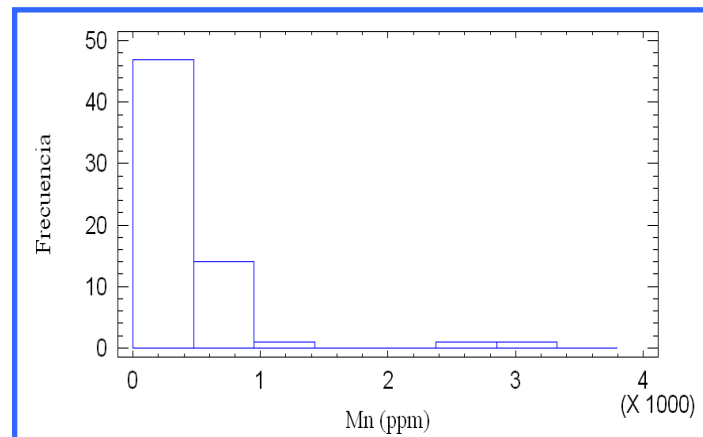
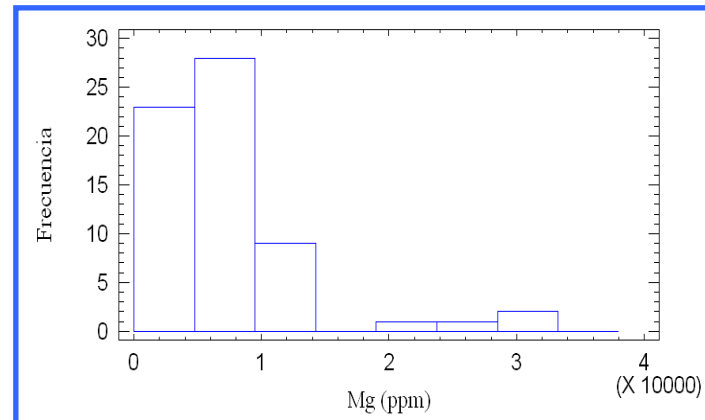
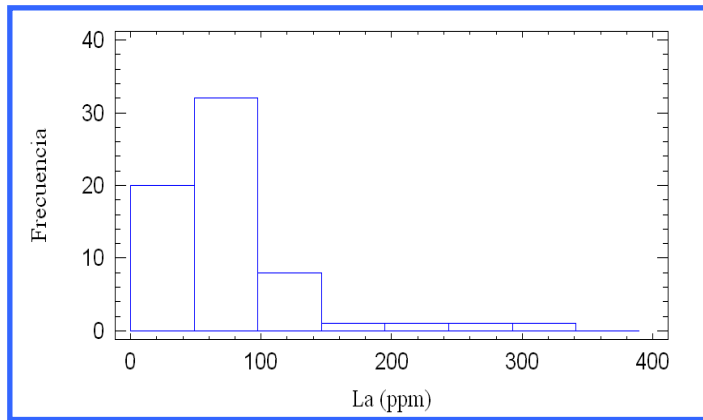




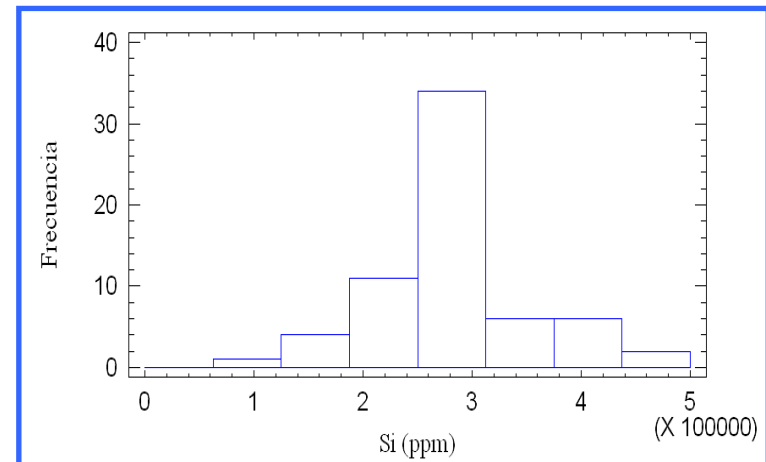
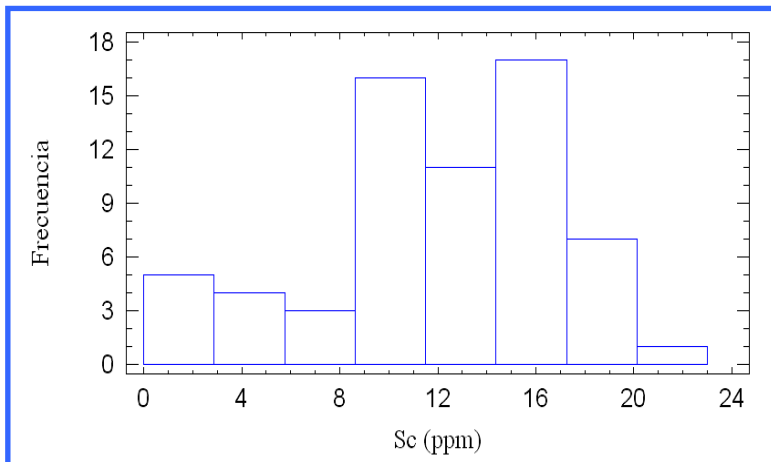
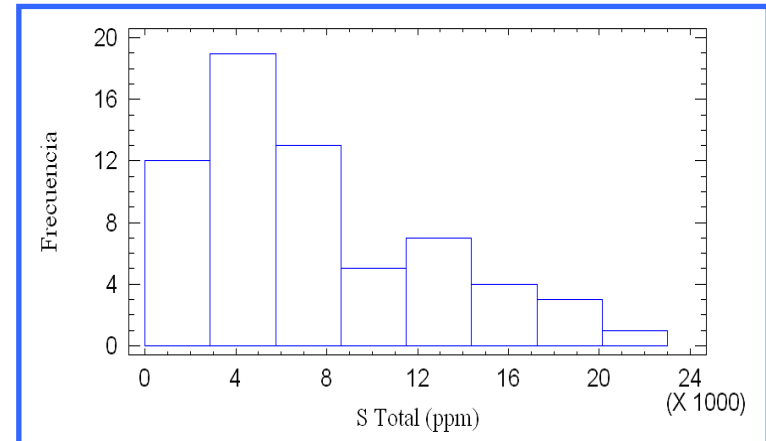
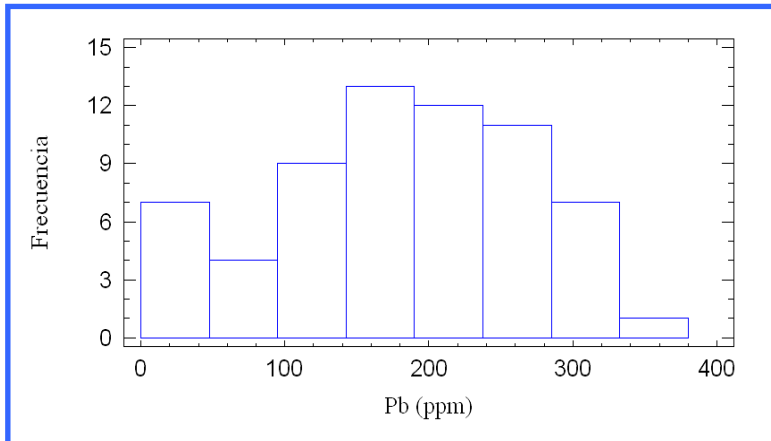
**ANEXO 17:** Histogramas de frecuencia para los elementos Ce, Cr, Cu y Fe.



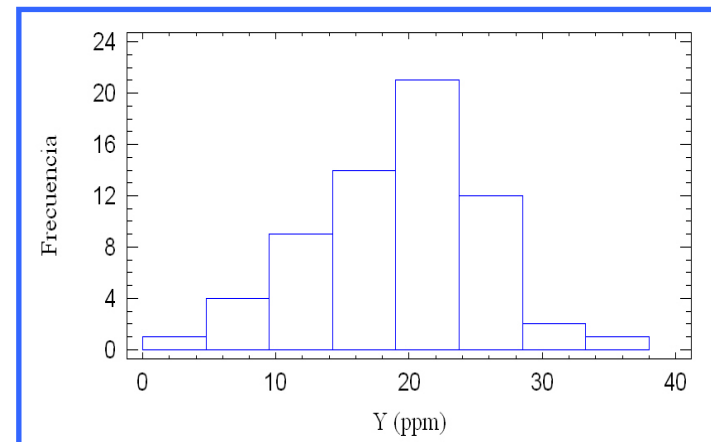
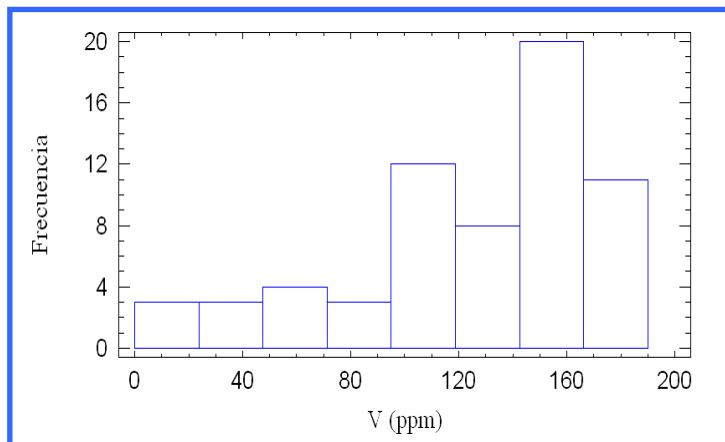
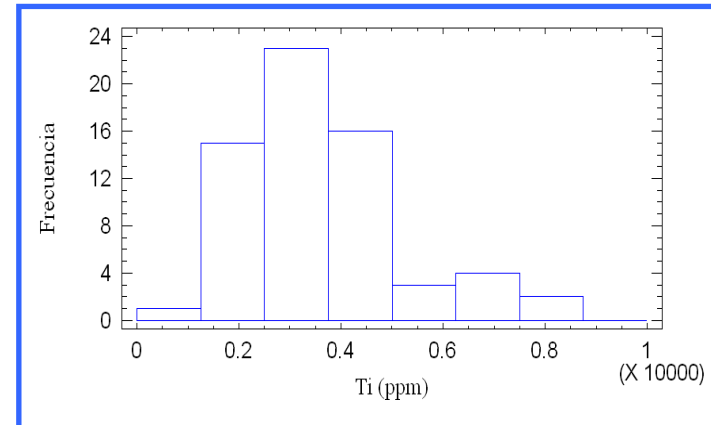
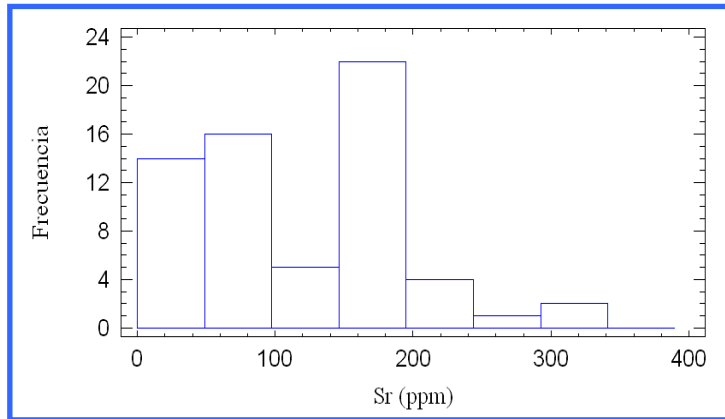
**ANEXO 18:** Histogramas de frecuencia para los elementos La, Mg, Mn y Ni.



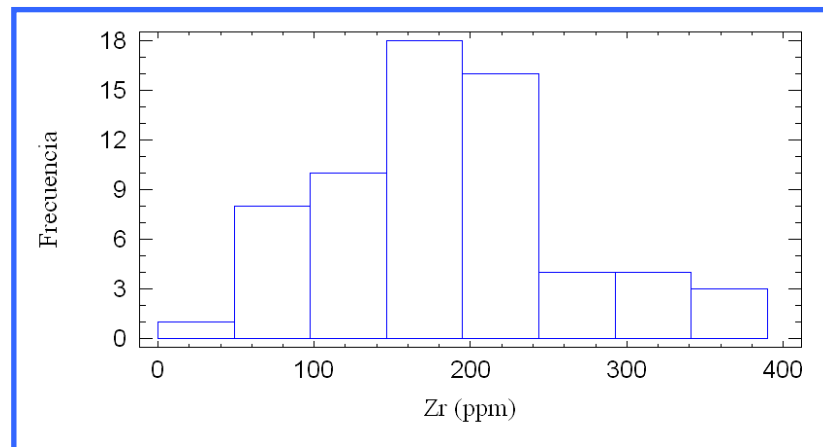
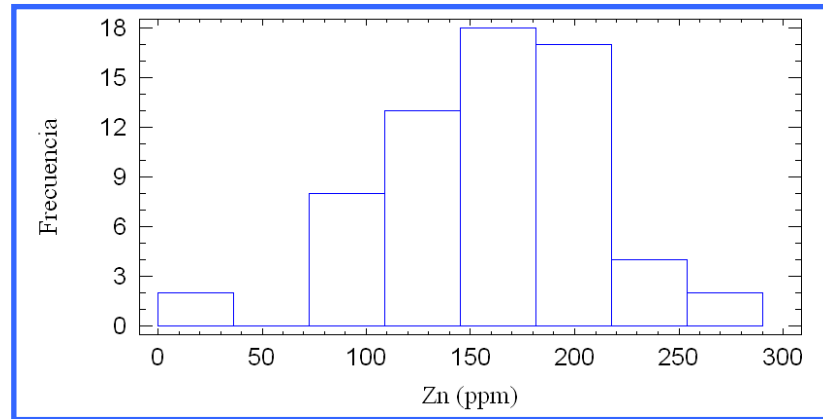
**ANEXO 19:** Histogramas de frecuencia para los elementos Pb, S, Sc y Si.



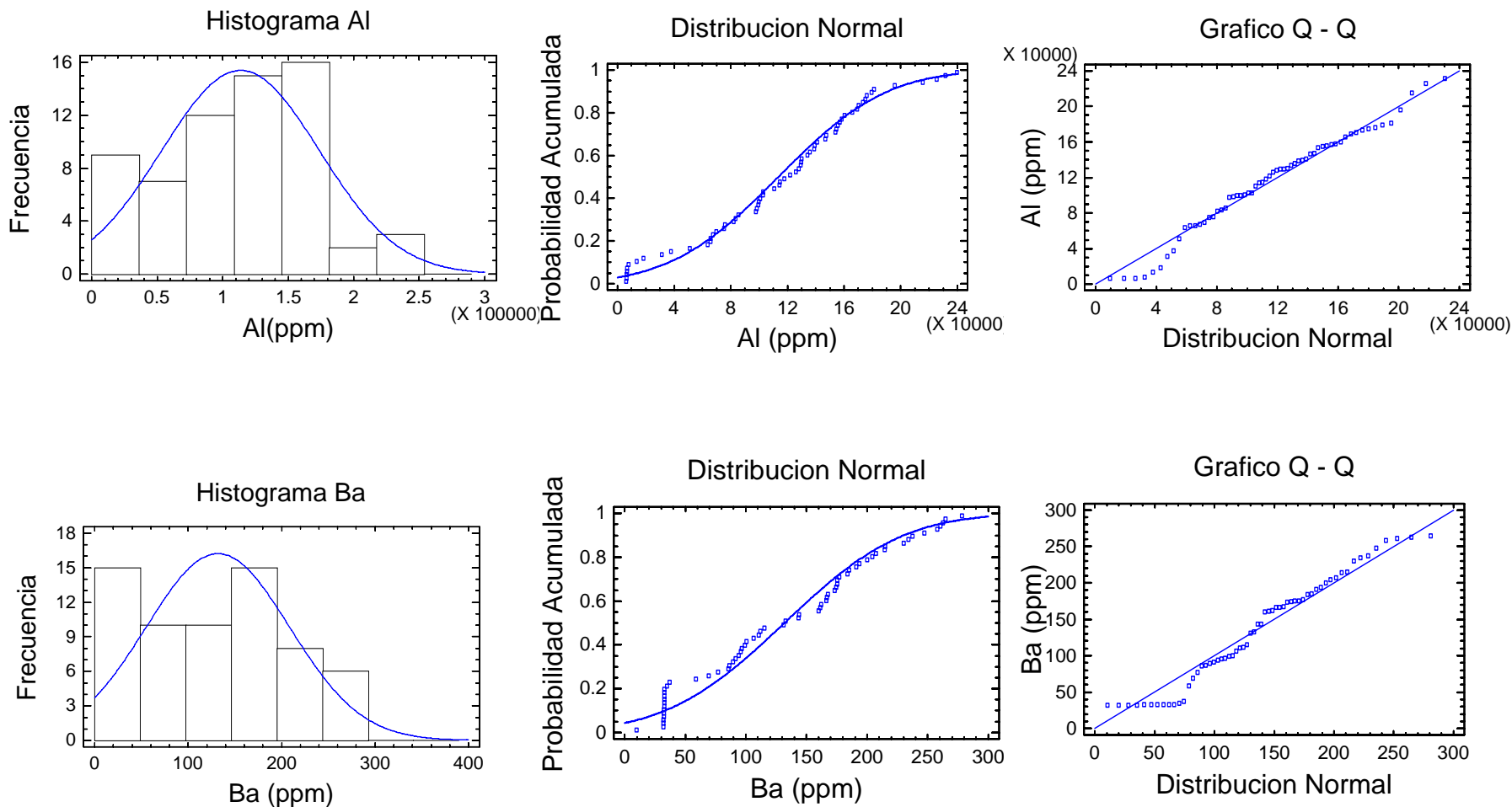
**ANEXO 20:** Histogramas de frecuencia para los elementos Sr, Ti, V y Y.



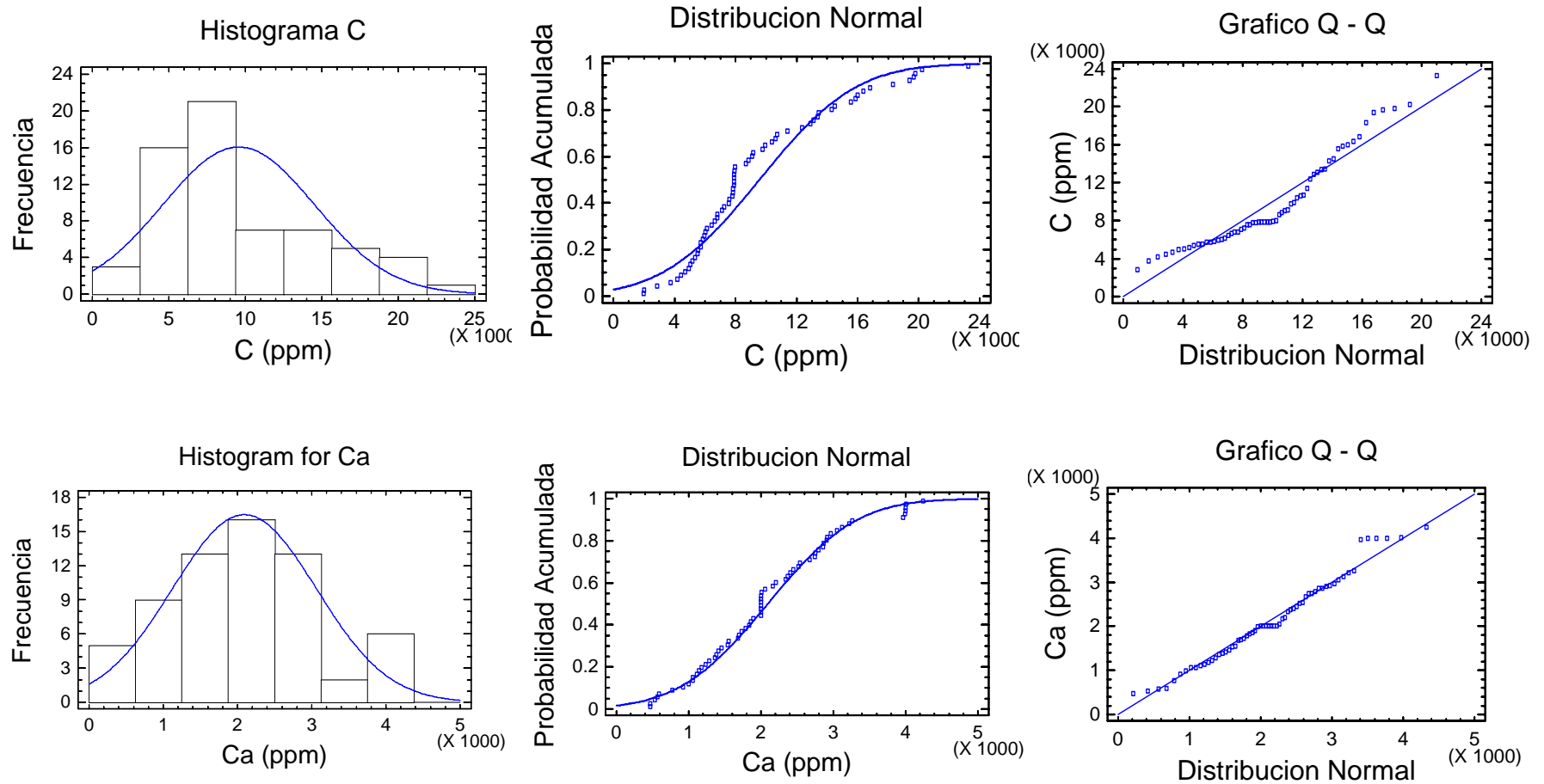
**ANEXO 21:** Histogramas de frecuencia para los elementos Zn y Zr.



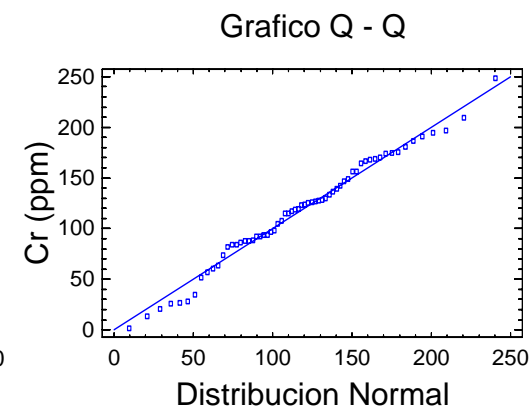
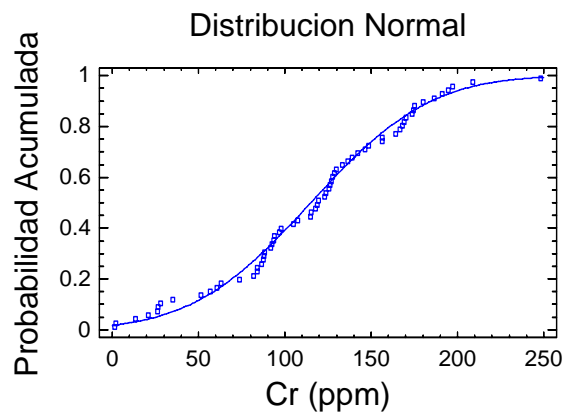
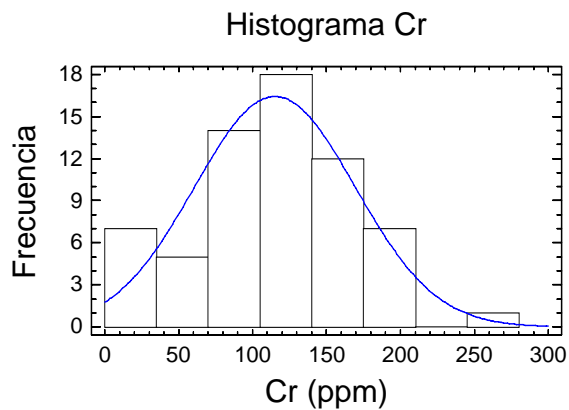
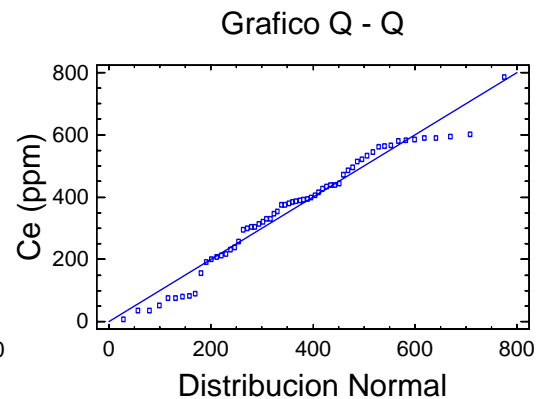
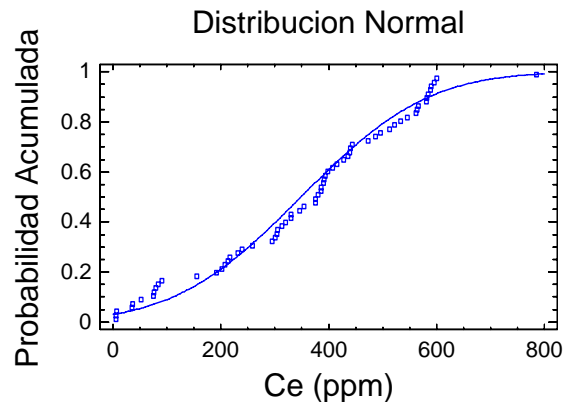
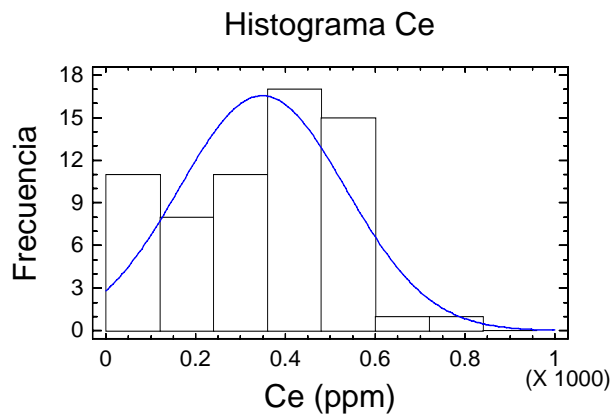
**ANEXO 22:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Al y Ba. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



**ANEXO 23:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables C y Ca. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana

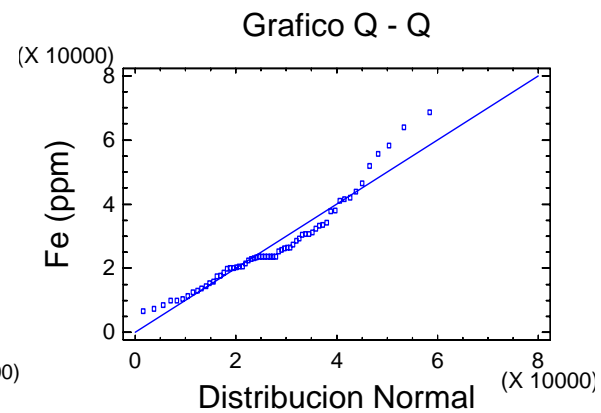
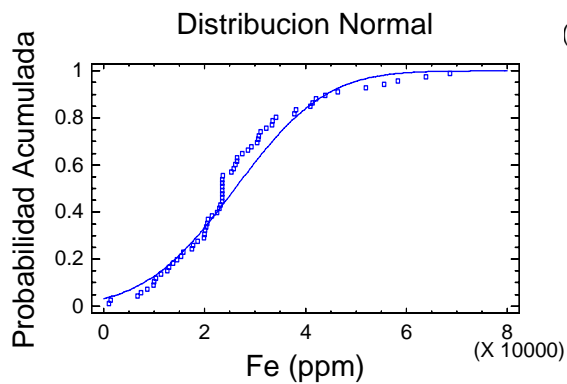
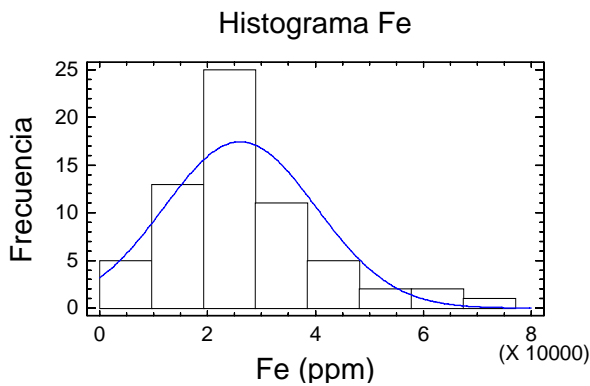
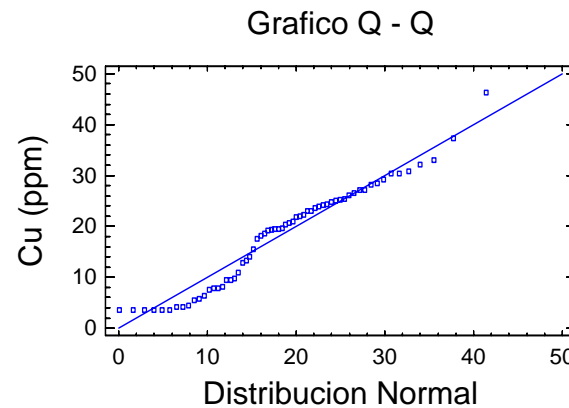
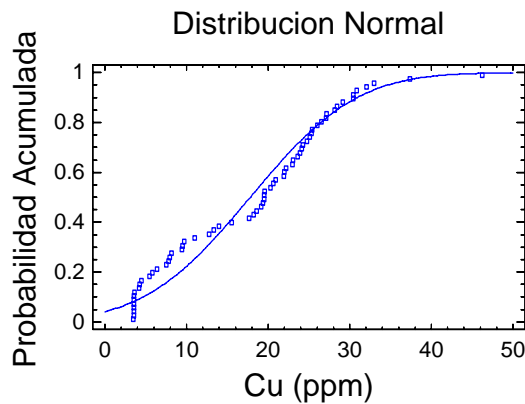
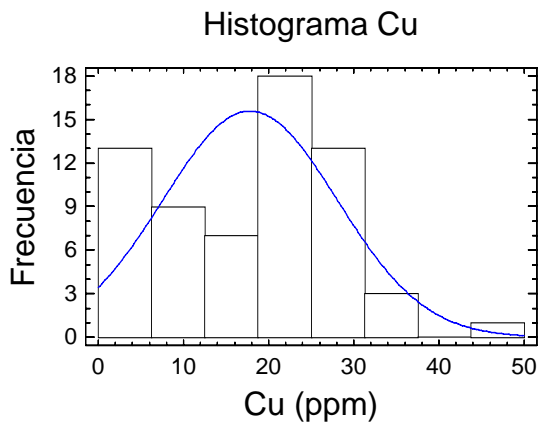


**ANEXO 24:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Ce y Cr. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana

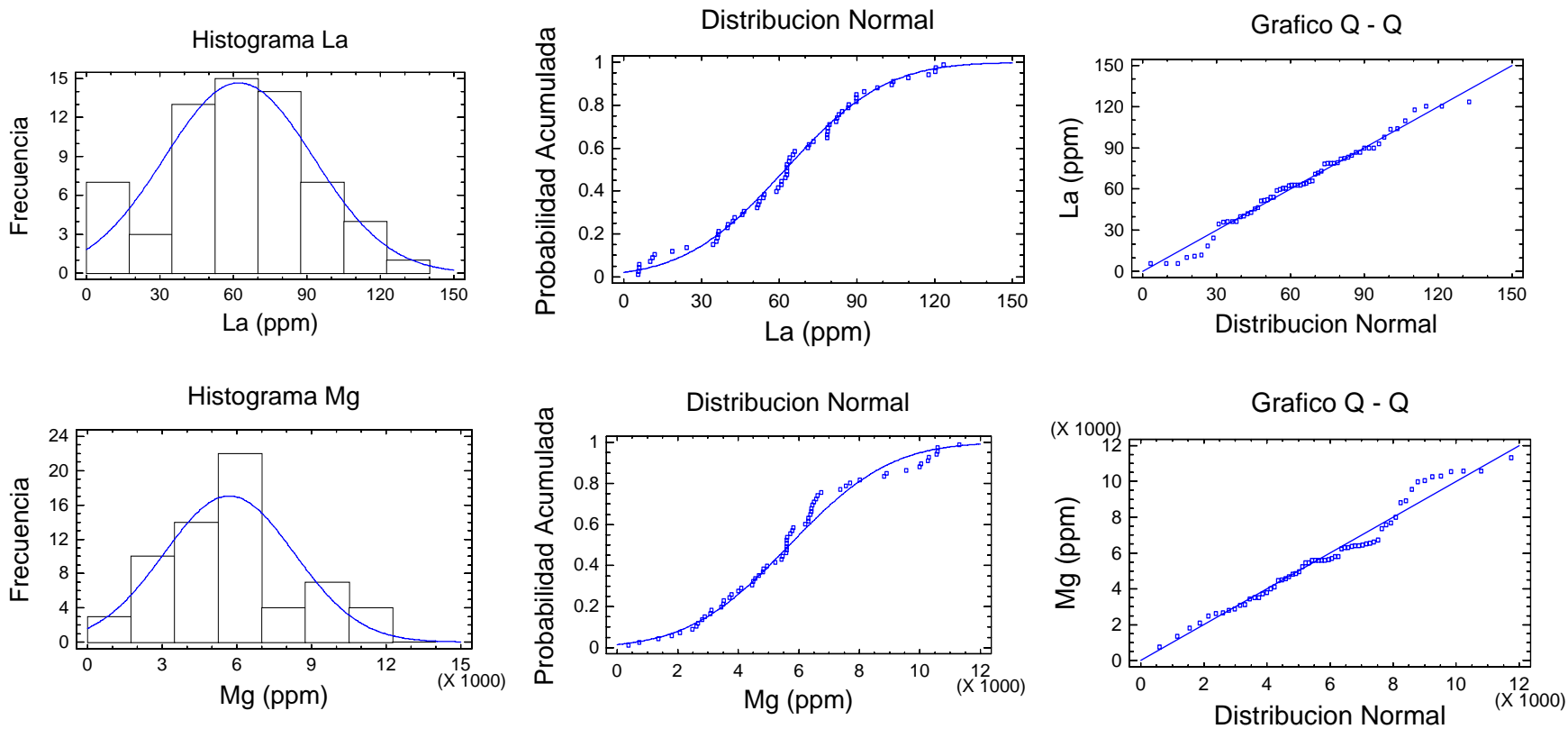




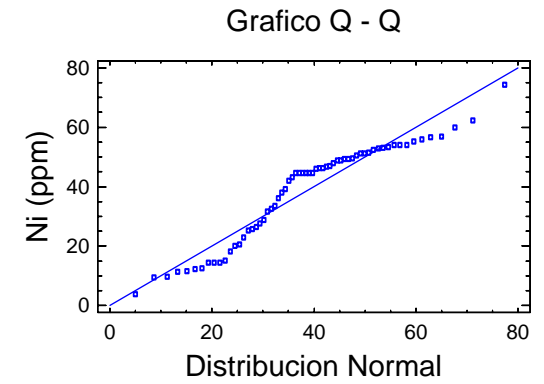
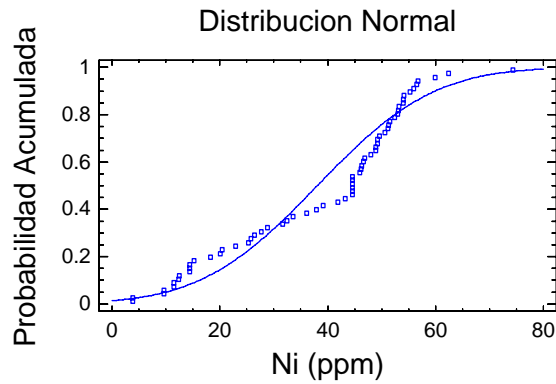
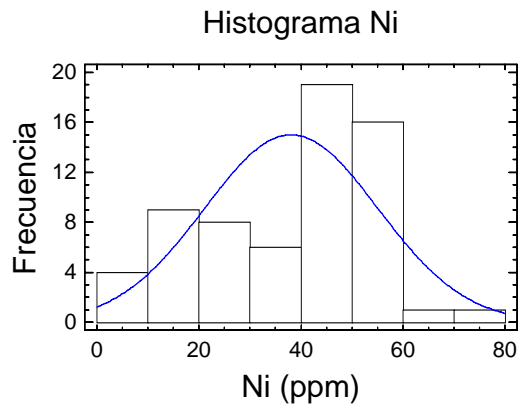
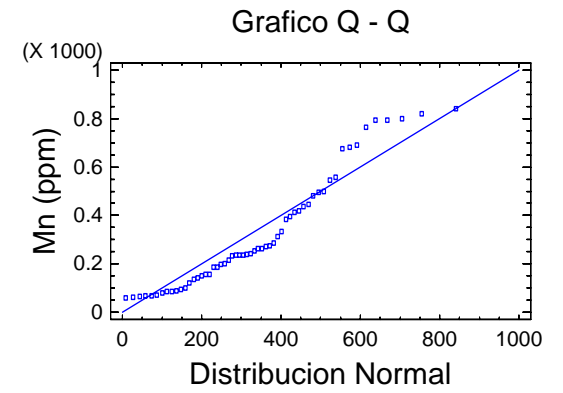
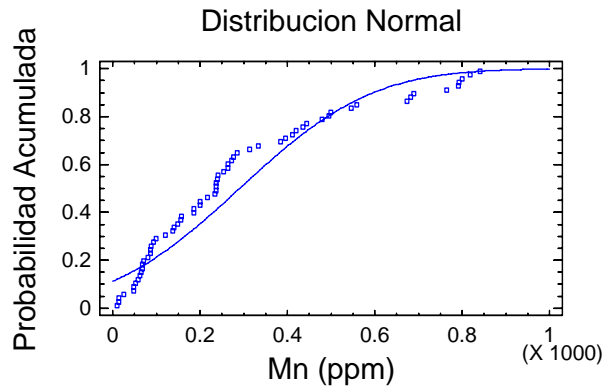
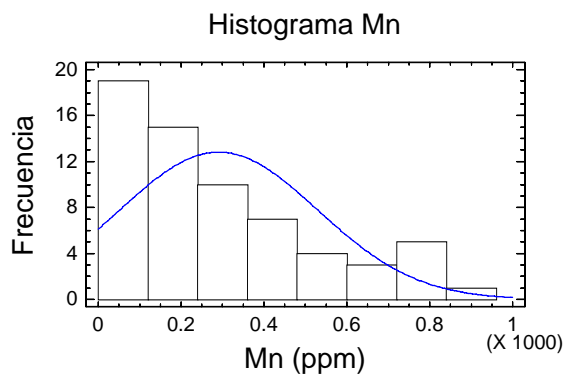
**ANEXO 25:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Cu y Fe. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



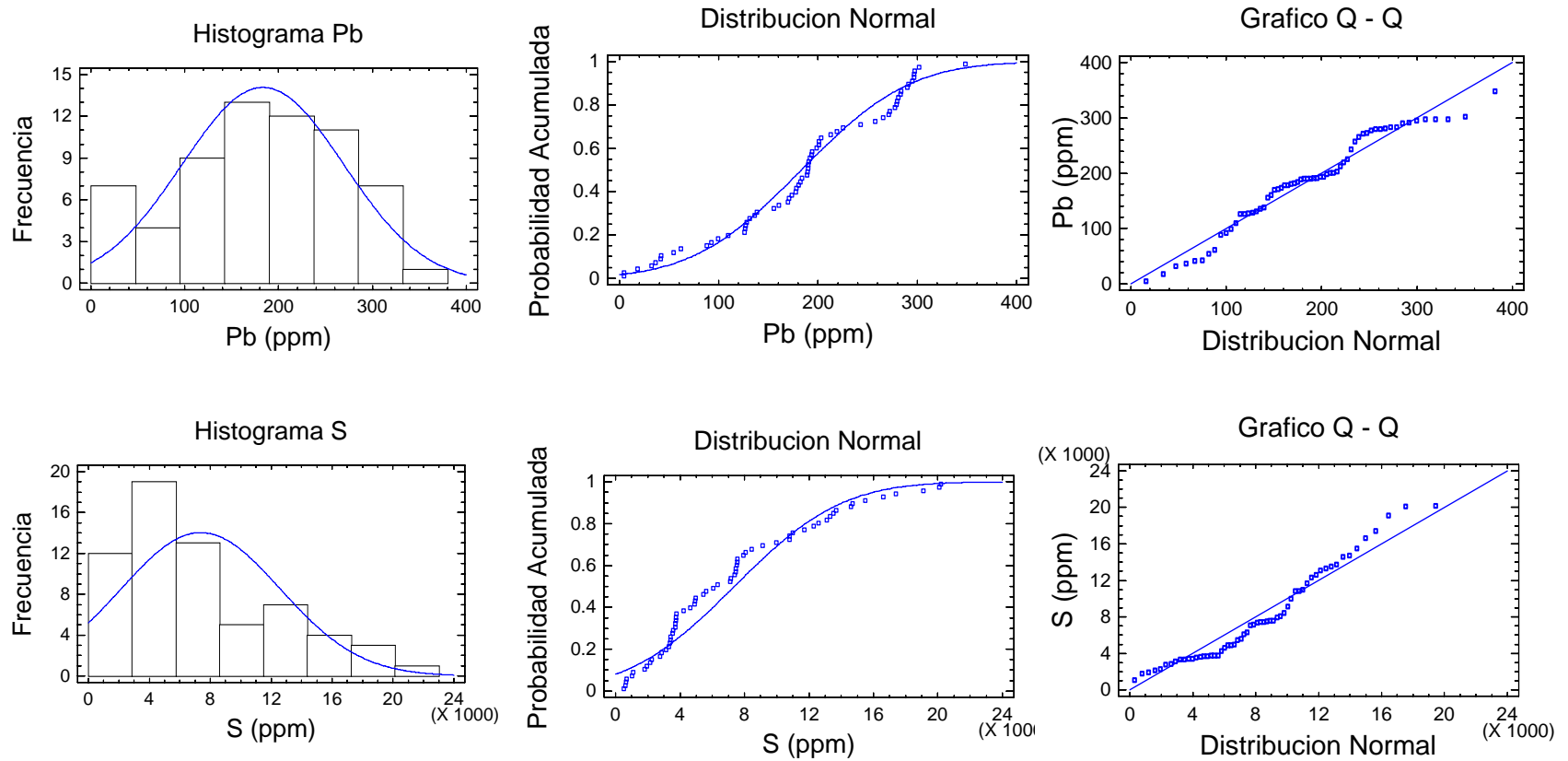
**ANEXO 26:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables La y Mg. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



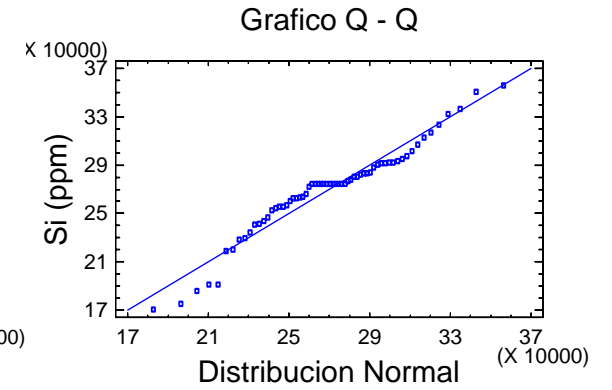
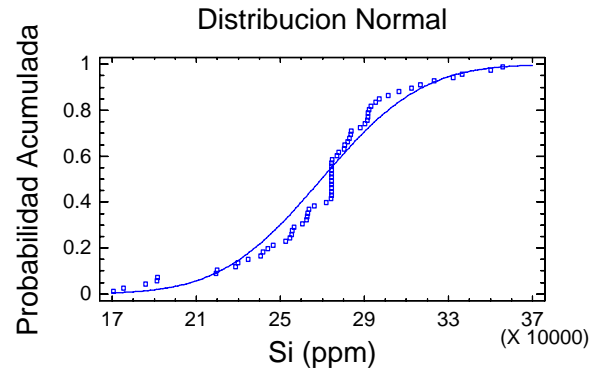
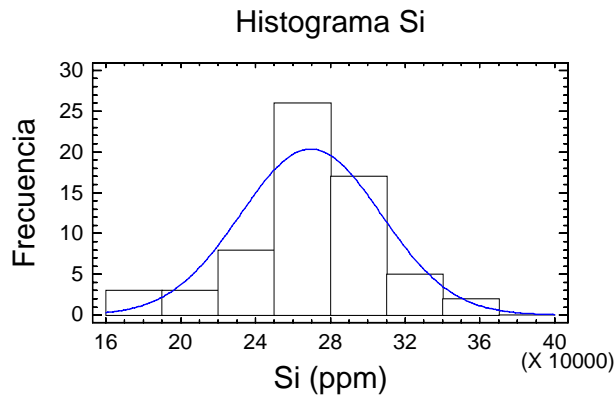
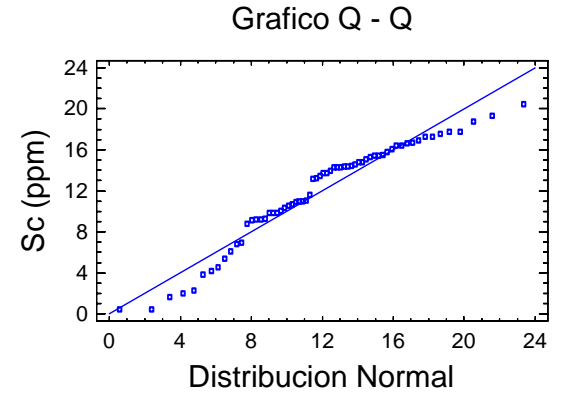
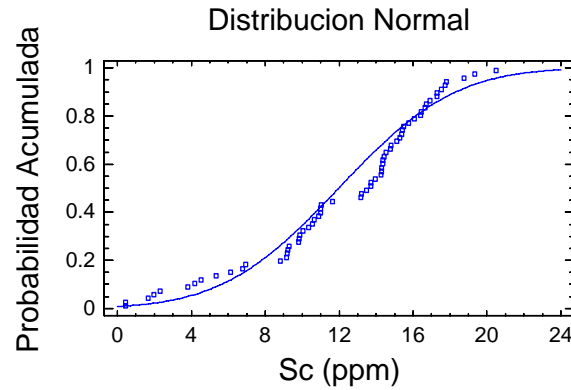
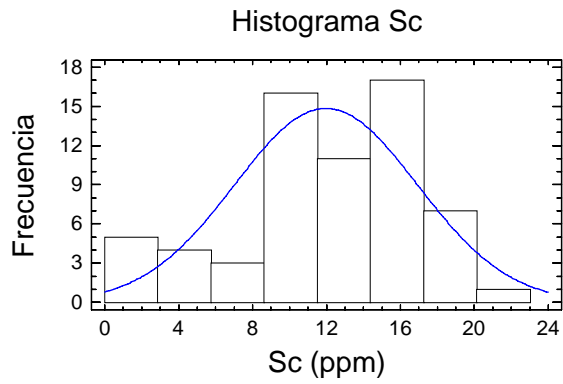
**ANEXO 27:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Mn y Ni. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



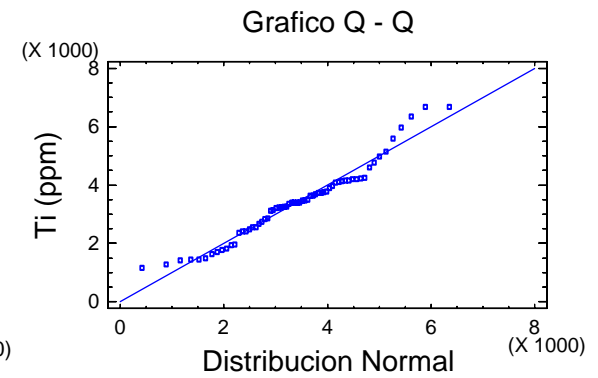
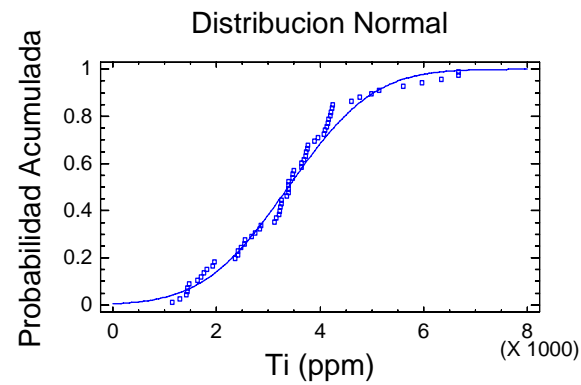
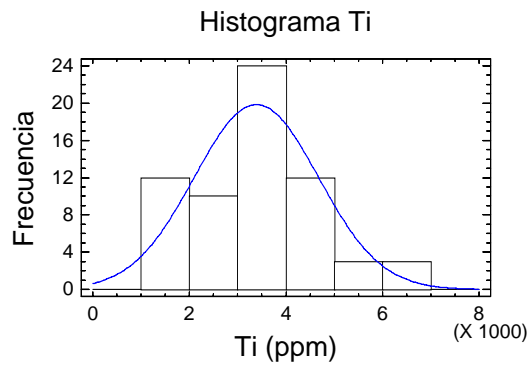
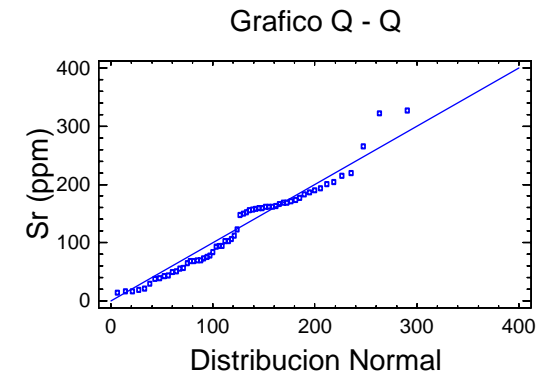
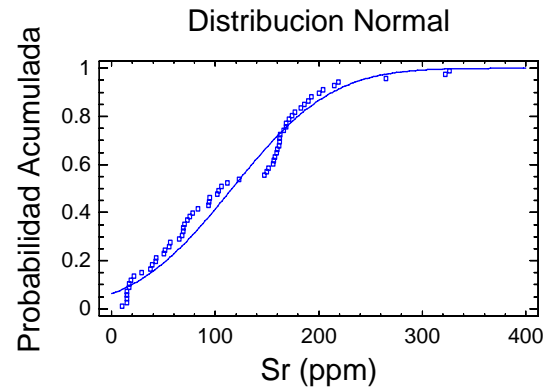
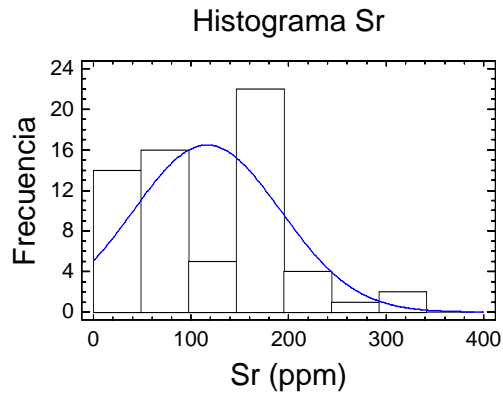
**ANEXO 28:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Pb y S. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



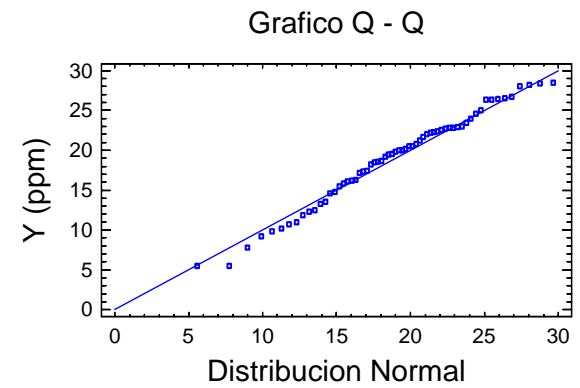
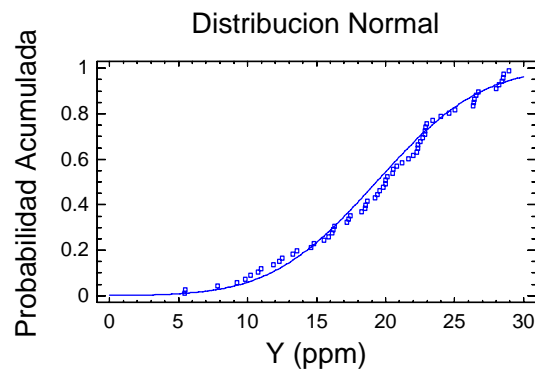
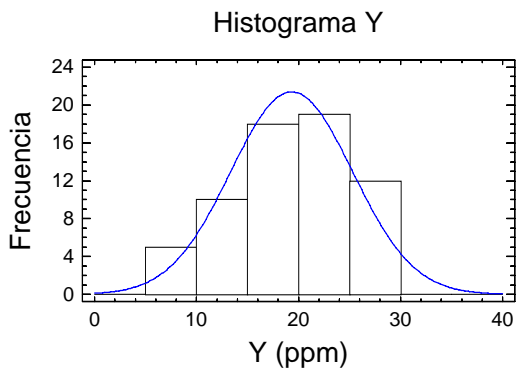
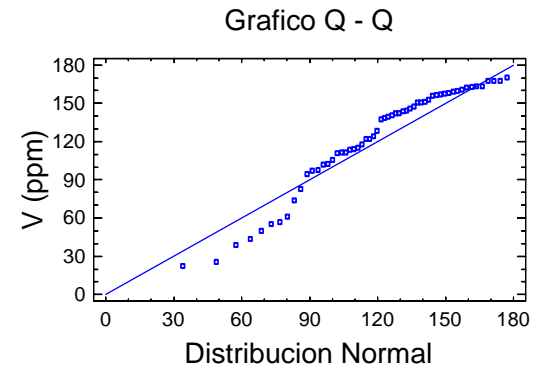
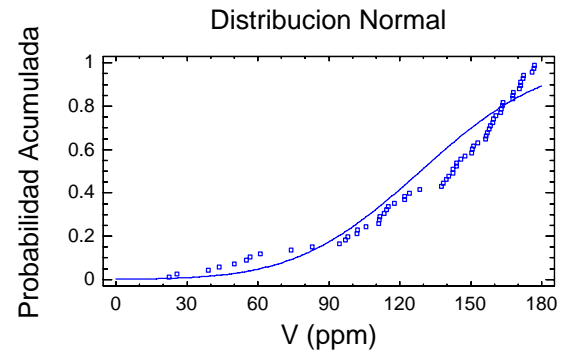
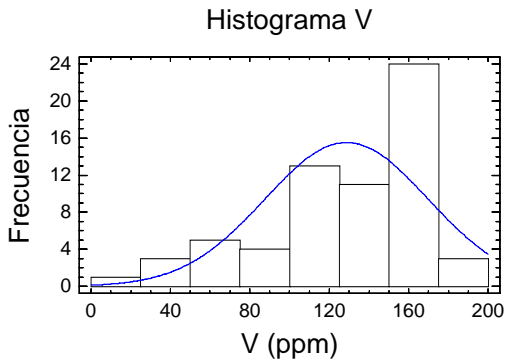
**ANEXO 29:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Sc y Si. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



**ANEXO 30:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables Sr y Ti. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana

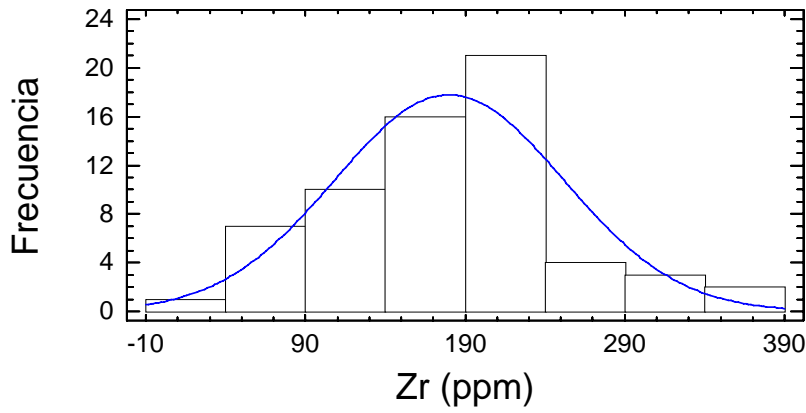


**ANEXO 31:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para las variables V y Y. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana



**ANEXO 32:** Histograma de frecuencia, curva de probabilidad y grafico Q – Q para la variable Zr. Los datos anómalos fueron reemplazados por la mediana

Histograma Zr



Distribucion Normal

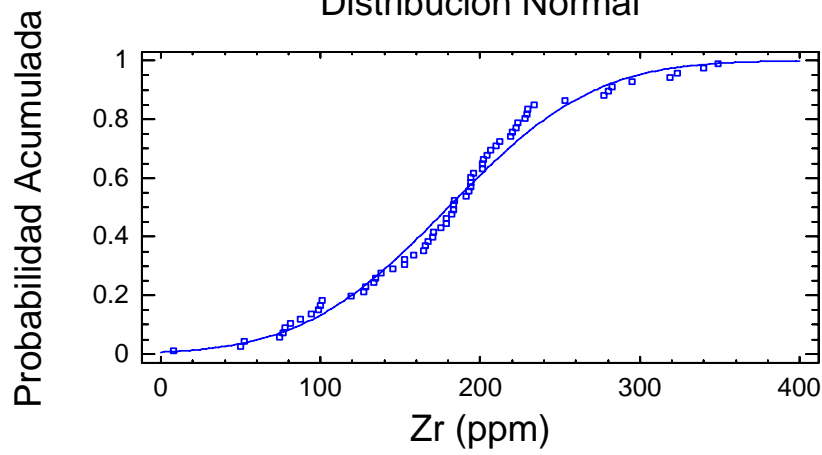


Grafico Q - Q

