

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**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**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero Geólogo  
Por los Brs.  
Leal Trujillo Freddy José  
Rivero Vásquez Orlando José

Caracas, Junio de 2004

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **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**

**Tutor Académico:** Prof. Ricardo Alezones

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero Geólogo  
Por los Brs.  
Leal Trujillo Freddy José  
Rivero Vásquez Orlando José

Caracas, Junio de 2004

Caracas, Junio de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Freddy Leal y Orlando Rivero, titulado:

**“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 de la quebrada paraíso”**

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

Prof. Lenín González  
Jurado

Prof. Olga Rey  
Jurado

Prof. Ricardo Alezones  
Tutor

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Agradecimientos de Freddy Leal.**

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por ser la casa de estudio que hoy me permite obtener el título de Ingeniero Geólogo.

Al Profesor Ricardo Alezones, tutor de este trabajo, quien me apoyó incondicionalmente durante toda la carrera.

A las Profesoras América Trujillo y Rosana Figueroa, por su valioso aporte en los análisis estadísticos y su interpretación.

A mis padres, por apoyarme en cada momento de mi vida.

A mi hermana, por ser mi mejor amiga y estar siempre presente.

A los Profesores Ramón González y Aitor Ichaso, por su colaboración espontánea y desinteresada en todo momento.

Al Profesor Manuel Martínez, por el apoyo prestado en los análisis de carbono total.

A César Rojas, Roger Salas, Yulner Romero, Doris Olivar y Miguel Arancibia, por haber estado allí a la hora exacta y en el momento correcto.

A la familia Córdova de Coro, por toda la colaboración prestada en cada uno de los viajes a campo.

## **Agradecimientos de Orlando Rivero.**

A mis padres, Orlando y Antonia, por ser lo maspreciado y hermoso que tengo en la vida, y por siempre creer en mi, en los momentos gratos y difíciles que he tenido que transitar.

A mis amistades, amigos y hermanos, que me acompañan en las buenas y las malas, no los nombro porque ellos saben quienes son.

A los profesores que han creído en mí, y que me han apoyado en este paso importante de mi vida.

Al personal bibliotecario de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

A los que no se encuentran para vivir estos momentos, pero que están en mi corazón.  
Bob, Jim, Max.....

**Leal T., Freddy J.,  
Rivero V., Orlando J.**

**ESTUDIO DE LITOFACIES Y QUIMIOESTRATIGRAFÍA DE LA SECCIÓN SUPERIOR DE LA FORMACION EL PARAÍSO COMO HERRAMIENTA PARA DETERMINAR POSIBLES CARACTERÍSTICAS DE POTENCIALIDAD GENERADORA Y/O ALMACENADORA DE HIDROCARBUROS EN LA SECCIÓN GEOLÓGICA DEL RÍO PARAÍSO**

**Tutor Académico: Ricardo Alezones. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología. 2004. 196 p.**

**Palabras Claves:** Geoquímica, Falcón, Formación El Paraíso, fluorescencia de rayos X, carbono total

**Resumen.** Mediante los métodos de fluorescencia por difracción de rayos X y determinación de carbono total por combustión se caracterizó químicamente la sección superior de la Formación El Paraíso en el estado Falcón. La sección se encuentra aflorando un kilómetro al sur de la población El Paraíso, sobre el río El Paraíso.

Además, se determinaron las litofacies presentes en la columna sedimentaria y se realizó una comparación con los resultados obtenidos de los análisis químicos.

Un total de 287 muestras fueron preparadas y analizadas mediante fluorescencia por difracción de rayos X. Este análisis químico consistió en la medición de las concentraciones (% en peso) de los óxidos mayoritarios SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, K<sub>2</sub>O, CaO; y del elemento traza V (ppm). Por su parte, para el análisis de carbono total se trabajó con 49 muestras y se determinó el porcentaje presente en éstas.

Mediante un análisis estadístico, que incluye análisis de agrupaciones, histogramas de frecuencia, diagramas de caja, diagramas de dispersión y perfiles de distribución se determinaron afinidades estadísticas entre los elementos mayoritarios. Además se establecieron funciones discriminantes para cada litología, así como también para cada unidad litológica definida.

La elaboración de perfiles de distribución en las variables usadas permitió definir dos unidades químicas, las cuales reflejan las variaciones litológicas de la columna estratigráfica en estudio. Por su parte, el análisis de agrupaciones permitió definir cinco grupos químicos en la secuencia estratigráfica

Se definen ocho litofacies y sus asociaciones permiten determinar los subambientes característicos de la Formación El Paraíso en la sección estudiada. El ambiente de depositación se define como lagunar para la parte basal, de marisma alta para la parte media y de marisma baja para la parte superior de la secuencia en estudio.

Las interpretaciones que resultan de los análisis quimioestratigráficos, permiten confirmar la correspondencia entre los valores obtenidos entre  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $TiO_2$  con las características arenosas o lutíticas de la Formación El Paraíso en la sección estudiada.

El promedio de carbono total para las lutitas analizadas es de 1.10%, a partir del cual se infiere que la capacidad generadora de las lutitas de la sección superior de la Formación El Paraíso es de moderada a buena.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	1
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	2
VÍAS DE ACCESO.....	3
METODOLOGÍA.....	5
Fase de Pre-Campo.....	5
Fase de Campo.....	6
Fase de Laboratorio.....	7
Fase de procesamiento de datos.....	13
CAPÍTULO II.....	16
MARCO TEÓRICO.....	16
ANÁLISIS QUÍMICOS.....	16
Fluorescencia por dispersión de rayos X.....	16
Análisis de carbono total.....	17
GEOQUÍMICA DE ROCAS SEDIMENTARIAS.....	19
TRABAJOS PREVIOS.....	25
CAPÍTULO III.....	30
MARCO GEOLÓGICO.....	30
GEOLOGÍA REGIONAL.....	30
Características fisiográficas y geomorfológicas.....	30
Estratigrafía y sedimentación de la cuenca.....	31
Geología estructural regional.....	57
Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón.....	65
Rocas ígneas de la cuenca de Falcón.....	78
CAPÍTULO IV.....	83
GEOLOGÍA LOCAL.....	83
GENERALIDADES.....	83
DESCRIPCIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS ESTUDIADOS.....	87
Afloramiento # 1.....	87
Afloramiento # 2.....	88
Afloramiento # 3.....	89
Afloramiento # 4.....	91
DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE UNIDADES LITOLÓGICAS.....	92
Unidad Litológica UL1.....	93
Unidad Litológica UL2.....	94
GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....	97
ANÁLISIS DE FACIES.....	100



Generalidades.....	100
Nomenclatura de litofacies .....	101
Definición de litofacies en la sección de estudio.....	104
ASOCIACIONES DE LITOFACIES.....	112
Generalidades.....	112
Ambientes y subambientes sedimentarios.....	113
Interpretación General.....	123
CAPITULO V.....	127
ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICO.....	127
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	127
Histogramas de frecuencia y diagramas de caja químicos.....	127
Diagramas de dispersión químicos.....	146
ANÁLISIS DE AGRUPACIONES.....	149
DIVISIÓN DE UNIDADES QUÍMICAS.....	153
FUNCIONES DISCRIMINANTES.....	161
CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ESQUEMA DE HERRON.....	164
CAPÍTULO VI.....	167
ASPECTOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LOS ANÁLISIS QUÍMICOS....	167
Relación de datos químicos con los datos litológicos.....	167
Relación de Unidades Químicas con Unidades Litológicas.....	168
CAPITULO VII.....	171
CARACTERÍSTICAS DE ROCA MADRE Y/O ROCA RESERVORIO.....	171
CARACTERÍSTICAS DE ROCA MADRE.....	171
Carbono Total.....	173
CARACTERÍSTICAS DE RESERVORIO.....	174
CAPÍTULO VIII.....	178
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	178
CONCLUSIONES.....	178
RECOMENDACIONES.....	180
CAPÍTULO IX.....	182
BIBLIOGRAFÍA.....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación relativa del área de estudio.....	2
Figura 1.2. Mapa de ubicación general del área de estudio.....	3
Figura 1.3. Equipo de molienda “Shatterbox”.....	8
Figura 1.4. Cámara de Tungsteno del Shatterbox.....	9
Figura 1.5. Portamuestra usado para análisis químicos.....	10
Figura 1.6. Espectrómetro Phillips (Minipal).....	12
Figura 1.7. Analizador columbimétrico de carbono.....	13
Figura 2.1. Esquema de clasificación geoquímico de Pettijohn <i>et al.</i> .....	21
Figura 2.2. Sistema de clasificación de sedimentos terrígenos.....	21
Figura 3.1 Ubicación de la Cuenca de Falcón y sus límites.....	31
Figura 3.2 Paleogeografía del Oligoceno.....	37
Figura 3.3 Paleogeografía del Mioceno Temprano.....	49
Figura 3.4. Paleogeografía del Mioceno medio/Tardío.....	52
Figura 3.5 Historia tectónica de la cuenca de Falcón durante el Eoceno Tardío	61
Figura 3.6 Historia tectónica de la cuenca de Falcón durante el Mioceno - Plioceno.....	61
Figura 3.7. Situación actual de la tectónica de la cuenca de Falcón.....	62
Figura 3.8 Evolución de las cuencas pull-apart Falcón y Bonaire.....	67
Figura 3.9 Modelo de generación de Cuencas pull-apart episuturales por el <u>desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Eoceno Tardío.....</u>	69
Figura 3.10 Modelo de generación de Cuencas pull-apart episuturales (suroeste Caribe).....	70
Figura 3.11. Modelo de generación de Cuencas pull-apart episuturales (suroeste Caribe).....	71
Figura 3.12 A) modelo original conceptual para la cuenca y B) una compilación estratigráfica.....	73
Figura 3.13 Modelo conceptual propuesto para la cuenca de Falcón.....	74
Figura 3.14 Secciones esquemáticas a través de la cuenca de Falcón.....	75
Figura 3.15 Mapa geológico de rocas ígneas en Falcón central.....	79
Figura 4.1. Parte basal del afloramiento # 1.....	88
Figura 4.2. Parte media del afloramiento # 2.....	89
Figura 4.3. Parte basal del afloramiento # 3.....	90
Figura 4.4. Parte media del afloramiento #3.....	91
Figura 4.5. Parte superior del afloramiento #3.....	91
Figura 4.6. Nódulos de óxidos a lo largo de la Unidad Litológica #2.....	96
Figura 4.7. Contacto concordante entre formaciones Pecaya y El Paraíso.....	99
Figura 4.8. Pliegues asociados a fallas inversas y frentes cabalgamientos.....	100
Figura 4.9. Arenisca de grano fino y laminación paralela.....	104

Figura 4.10. Arenisca de grano fino con moldes de concha.....	105
Figura 4.11. Arenisca de grano fino con rizaduras en el tope.....	106
Figura 4.12. Arenisca de grano fino con restos de fósiles.....	108
Figura 4.13. Lutitas negras laminadas y masivas.....	109
Figura 4.14. Capas de carbón con restos de jarosita.....	110
Figura 4.15. Lutita carbonosa con restos de jarosita.....	111
Figura 4.16. Heterolitas.....	112
Figura 4.17. Extracto de la columna estratigráfica correspondiente a un ambiente de laguna.....	114
Figura 4.18. Sección transversal estratigráfica del intervalo superior de La Ventana Tongue en Hogback Mountain.....	117
Figura 4.19. Mapa modelo de un ambiente lagunal.....	118
Figura 4.20. Diagrama de clasificación de marismas salobres.....	121
Figura 4.21. Extracto de la columna estratigráfica correspondiente a un ambiente de marisma baja.....	122
Figura 4.22. Extracto de la columna estratigráfica correspondiente a un ambiente de marisma alta.....	123
Figura 5.1. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Al_2O_3$ .....	128
Figura 5.2. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Al_2O_3$ en areniscas.....	129
Figura 5.3. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Al_2O_3$ en lutitas....	129
Figura 5.4. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $SiO_2$ .....	130
Figura 5.5. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $SiO_2$ en areniscas.....	131
Figura 5.6. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $SiO_2$ en lutitas...	131
Figura 5.7. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $CaO$ .....	132
Figura 5.8 Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $CaO$ en areniscas.....	133
Figura 5.9. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $CaO$ en lutitas....	133
Figura 5.10. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $K_2O$ .....	134
Figura 5.11. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $K_2O$ en areniscas.....	135
Figura 5.12. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $K_2O$ en lutitas...	135
Figura 5.13. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $TiO_2$ .....	136
Figura 5.14. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $TiO_2$ en areniscas.....	137
Figura 5.15. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $TiO_2$ en lutitas...	137
Figura 5.16. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $MnO$ .....	138
Figura 5.17. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $MnO$ en areniscas.....	139
Figura 5.18. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $MnO$ en lutitas...	139
Figura 5.19. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Fe_2O_3$ .....	140
Figura 5.20. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Fe_2O_3$ en areniscas	141

Figura 5.21. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para $Fe_2O_3$ en lutitas.	141
Figura 5.22. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para MgO .....	142
Figura 5.23. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para MgO en areniscas.....	143
Figura 5.24. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para MgO en lutitas...	143
Figura 5.25. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para V .....	144
Figura 5.26. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para V en areniscas...	145
Figura 5.27. Histograma de frecuencia y diagrama de caja para V en lutitas.....	145
Figura 5.28. Dendograma correspondientes a todas las muestras de la sección superior de la Formación El Paraíso.....	152
Figura 5.29. Clasificación de los sedimentos terrígenos correspondientes a la sección superior de la Formación El Paraíso según el esquema de Herron.....	165
Figura 5.30. Distribución de litología según el esquema de Herron.....	165
Figura 7.1. Fotomicrografía muestra MQP-400.....	176
Figura 7.2. Fotomicrografía muestra MQP-415.....	176
Figura 7.3. Fotomicrografía muestra MQP-483.....	177

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Composición química de rocas sedimentarias.....	20
Cuadro 5.1. Estadística descriptiva para el $Al_2O_3$ .....	128
Cuadro 5.2. Estadística descriptiva para el $Al_2O_3$ en areniscas y lutitas.....	129
Cuadro 5.3. Estadística descriptiva para el $SiO_2$ .....	130
Cuadro 5.4. Estadística descriptiva para el $SiO_2$ en areniscas y lutitas.....	131
Cuadro 5.5. Estadística descriptiva para el $CaO$ .....	132
Cuadro 5.6. Estadística descriptiva para el $CaO$ en areniscas y lutitas.....	133
Cuadro 5.7. Estadística descriptiva para el $K_2O$ .....	134
Cuadro 5.8. Estadística descriptiva para el $K_2O$ en areniscas y lutitas.....	135
Cuadro 5.9. Estadística descriptiva para el $TiO_2$ .....	136
Cuadro 5.10. Estadística descriptiva para el $TiO_2$ en areniscas y lutitas.....	137
Cuadro 5.11. Estadística descriptiva para el $MnO$ .....	138
Cuadro 5.12. Estadística descriptiva para el $MnO$ en areniscas y lutitas	139
Cuadro 5.13. Estadística descriptiva para el $Fe_2O_3$ .....	140
Cuadro 5.14. Estadística descriptiva para el $Fe_2O_3$ en areniscas y lutitas.....	141
Cuadro 5.15. Estadística descriptiva para el $MgO$ .....	142
Cuadro 5.16. Estadística descriptiva para el $MgO$ en areniscas y lutitas.....	143
Cuadro 5.17. Estadística descriptiva para el V.....	144
Cuadro 5.18. Estadística descriptiva para el V en areniscas y lutitas.....	145
Cuadro 5.19. Coeficientes de correlación.....	146
Cuadro 5.20. Coeficientes de correlación en areniscas.....	147
Cuadro 5.21. Coeficientes de correlación en lutitas.....	148
Cuadro 5.22. Prueba de medias de los grupos obtenidos.....	149
Cuadro 5.23. Distribución de muestras según litología en los grupos químicos..	150
Cuadro 5.24. Estadística descriptiva de las unidades químicas.....	154
Cuadro 5.25. Clasificación de las funciones discriminantes por litología.....	162
Cuadro 5.26. Clasificación de las funciones discriminantes por unidades químicas.....	163
Cuadro 7.1. Promedios de COT para cada grupo litológico.....	174
Cuadro 7.2. Capacidad generadora de hidrocarburo en base a COT	174
Cuadro 7.3. Porosidad promedio de los principales campos y áreas productores de la Cuenca de Falcón.....	175
Cuadro 7.4. Resultados del análisis petrográfico.....	175
Cuadro 7.5. Clasificación según el esquema de areniscas terrígenas de Pettijohn et al.....	177

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### OBJETIVOS

#### Objetivo general

Realizar la caracterización química mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (FRX-DE) de la sección estratigráfica tipo perteneciente a la sección superior de la Formación El Paraíso, que se encuentra aflorando en el río Paraíso, al sur del estado Falcón.

#### Objetivos específicos

- ❖ Aprender y dominar las técnicas de fluorescencia de difracción de rayos X en la determinación de componentes mayoritarios que componen las rocas, específicamente sedimentarias.
- ❖ Determinar las posibles características de potencialidad generadora y/o almacenadora de hidrocarburos mediante análisis de carbono total y petrografía
- ❖ Elaborar una columna estratigráfica de la sección en estudio.
- ❖ Realizar una clasificación y análisis de facies, para establecer la relación entre los ambientes sedimentarios de depositación y los ambientes químicos presentes en el momento de la depositación.
- ❖ Elaborar un mapa geológico de la sección en estudio.

- ❖ Comparar los resultados obtenidos del análisis de facies con los resultados químicos obtenidos.

## UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la llanura central entre la Sierra de San Luis y la Sierra de Churuguara, 12 km al sur de la población de Pecaya, específicamente entre las coordenadas reticulares: N: 1.205.000 – 1.212.000 y E: 408.000 – 415.000 (ver figuras 1.1 y 1.2).



Tomado de [www.mapasdevenezuela.com](http://www.mapasdevenezuela.com)



Área de Estudio.

Figura 1.1. Ubicación relativa del área de estudio donde se encuentra la sección estudiada.

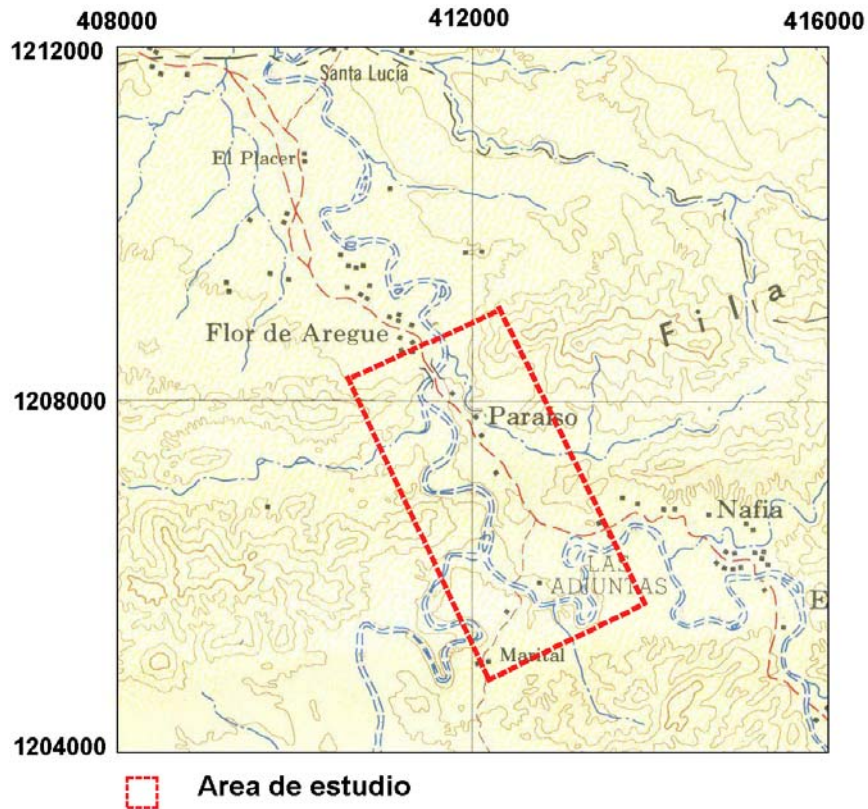


Figura 1.2. Mapa de ubicación general del área donde se encuentran la sección estudiada. Tomado y modificado de la hoja 6248 a escala 1:100.000 de Cartografía Nacional.

## VÍAS DE ACCESO

El acceso a la sección es relativamente fácil, puede realizarse a través de carreteras de asfalto, así como de tierra. En épocas de lluvia es necesario el uso de vehículo de doble tracción.

Para llegar a la sección tipo de la Formación El Paraíso es necesario seguir la carretera Coro – Dos Bocas, recorriendo unos 70 km hasta llegar al desvío que conduce a la población de Cabure. A partir de este desvío se recorren aproximadamente 30 km hasta llegar a la población de La Cruz de Taratara.



Una vez en ese punto se debe tomar el camino en dirección oeste que conduce hacia la población de Pecaya, donde se ubica el campamento a utilizar durante el trabajo de campo. Este recorrido es de unos 35 km por carretera de asfalto bastante irregular.

Aproximadamente 10 km antes de llegar a la población de Pecaya existe un desvío, específicamente en el sector Las Lajas, el cual conduce hacia la quebrada Paraíso. Esta quebrada es conocida localmente como La Bocaina o Acaca. A partir de este desvío se recorren 8 km aproximadamente en sentido SO, pasando por el cementerio y posteriormente cruzando el río Mitare para arribar al caserío de Orotoy.

Al sur de Orotoy se encuentra una encrucijada, conocida como la entrada al Lindero. En este punto se ubican dos vías, ambas conducen a la quebrada Paraíso aunque con rutas distintas.

El camino del lado este recorre el lado oriental del río Paraíso en dirección hacia el sur. Por esta vía se atraviesa el caserío el Lindero, que se encuentra hacia el flanco sur del Cerro La Bocaina. Pasando el Lindero, a unos 5 km se encuentra el caserío El Paraíso Arriba, a partir de este punto se accede caminando a la quebrada por un estrecho camino.

Por su parte, el camino del lado oeste recorre el lado occidental del río Paraíso. Esta vía conduce hacia los caseríos de El Porvenir y Tierra Blanca a pocos kilómetros de la encrucijada. A partir de Tierra Blanca se recorren 2 km hasta llegar a lo que se conoce como El Paraíso Abajo. Desde este punto se recorre 1 km hasta llegar al río Paraíso, en donde se encuentra la Iglesia Santa María. Siguiendo hacia el sur, aproximadamente a 1 km se cruza la quebrada el Paraíso, en un lugar conocido como El Paso, a partir de aquí se recorre la quebrada caminando por el cauce del río.

Las vías de acceso descritas anteriormente pueden ser observadas con detalle en el mapa que corresponde al anexo 1.

## METODOLOGÍA

Para la llevar a cabo este Trabajo Especial de Grado, fue necesario realizar las siguientes fases:

### **Fase de Pre-Campo:**

Realizada entre los meses de abril / junio del año 2003, consta de los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica de trabajos previos realizados en la zona (esta etapa continuó durante todas las fases).
- Revisión e interpretación de las fotografías aéreas del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, misión 0202128 a escala 1:50.000 (216 al 218, 900 al 902,054 al 056, 085, 648 y 649), para reconocimiento de la quebrada, y vías de acceso a la misma.
- Revisión de los mapas topográficos del I.G.V.S.B a escala regional 1:100.000 de las hojas 6248 Churuguara y la hoja 6249 Cabure pertenecientes al año 1969.
- A escala local se revisaron las siguientes hojas cartográficas a escala 1:25.000 del I.G.V.S.B, pertenecientes al año 1966; 6248-I-NO, 6248-I-NE, 6248-I-SE, 6248-I-SO, 6249-I-SE, 6249-II-NE, 6249-II-SE, 6249-II-SO.
- Revisión del mapa de geología de superficie de Creole Petroleum Corporation C-5-A y C-5-B, a escala 1:50.000, año 1962.
- Revisión del mapa de geología de superficie de Díaz de Gamero (1977).
- Digitalización de las hojas cartográficas a escala 1:25.000 del I.G.V.S.B, pertenecientes al año 1966; 6248-III-NE, 6248-IV-NE y 6248-IV-SE.
- Digitalización de una sección de los mapas de geología de superficie de Creole Petroleum Corporation C-5-A y C-5-B, a escala 1:50.000, año 1962.
- Digitalización de una sección del mapa de Geología de superficie de Díaz de Gamero (1977) a escala 1:75000.

Esta digitalización se realizó con la finalidad de generar una compilación cartográfica sobre la cual se graficaron los datos obtenidos en el presente trabajo.

### **Fase de Campo**

La fase de campo se realizó en dos etapas, la primera comprendida entre las semanas 2 y 3 de junio, la segunda durante las semanas 3 y 4 de septiembre de 2003.

Las fases antes mencionadas comprendieron los siguientes pasos:

- Reconocimiento de las vías de acceso a la quebrada.
- Recolección de muestras: para ello se siguieron los siguientes pasos:

1. Ubicación de los afloramientos: para la ubicación de los afloramientos fue necesario ubicar la quebrada Paraíso, una vez ubicados en ésta, se recorrió aguas arriba hasta ubicar los afloramientos correspondientes a la sección superior de la Formación El Paraíso.

2. Descripción de los afloramientos: una vez ubicado los afloramientos se describió la litología presente en cada uno de ellos, así como también se tomaron mediciones de orientación de los planos (rumbo y buzamiento de los estratos) y recolección de muestras.

3. Para el análisis quimioestratigráfico la metodología consistió en tomar muestras a intervalos de 3 metros de distancia en forma horizontal, recolectándose un total de 287 muestras.

4. Enumeración de las muestras: las muestras fueron enumeradas según el siguiente criterio:

a. Para las muestras de análisis químico se colocaron primero las siglas MQP, que significa muestras de la quebrada Paraíso.

b. Posterior al primer conjunto de siglas se colocaba una letra Q para las muestras de análisis químico, seguido a estas letras se colocaba una numeración de tres dígitos, donde el primer número pertenece al afloramiento levantado y los dos posteriores el número de muestra correspondiente.

5. Se levantó una poligonal en forma simultánea con la recolección de las muestras, para ello se utilizó una cinta métrica de 50 metros de longitud, una brújula Brunton, así como un GPS Garmin previamente calibrado.

### **Fase de Laboratorio**

La fase de laboratorio fue dividida en 3 partes:

- Preparación de muestras.
- Análisis químicos.
- Análisis petrográficos.

#### Preparación de las muestras:

Para poder realizar los análisis químicos fue necesario preparar las muestras según la siguiente metodología:

- *Secado*: Las muestras que presentaban mayor humedad fueron colocadas en condiciones ambientales durante 48 horas para su secado. Las mismas, se colocaron de manera aislada para evitar cualquier riesgo de contaminación.

- *Disgregación previa:* Antes de pulverizar las muestras fue necesario disgregar las mismas. La muestra fue cubierta con hojas limpias para evitar contaminación alguna y colocada sobre una plancha de acero de 15x15 cm., sobre la cual se golpeó con una piqueta para ser disgregada.
- *Pulverizado:* Una vez secadas y disgregadas las muestras se procedió a pulverizarlas. De cada muestra se tomó una porción aproximada de 150 gr. que se colocó en un equipo de molienda *Shatterbox* (ver figura 1.3), este equipo está compuesto por una cámara de carburo de tungsteno (ver figura 1.4), la cual al vibrar permite pulverizar la muestra. El tiempo de pulverización fue de aproximadamente de 2 a 5 minutos dependiendo del tipo de litología de la muestra, en el caso de las lutitas y carbones el tiempo era menor que en el caso de las areniscas.



Figura 1.3. Equipo de molienda “Shatterbox”.



Figura 1.4. Cámara de Tungsteno del Shatterbox.

Para cada muestra pulverizada es necesario realizar la limpieza de la cámara para reducir el riesgo de contaminación de las muestras. La limpieza fue realizada según el siguiente procedimiento:

1. Se limpia la cámara con una brocha para remover los restos de muestras presentes.
2. Se coloca una pequeña cantidad de cuarzo, y se pulveriza durante un minuto, de manera de remover con mayor eficiencia los restos de muestras en las paredes de la cámara.
3. Se extrae el cuarzo ya pulverizado con el uso de una brocha.
4. Se limpia la cámara con papel absorbente impregnado con alcohol isopropílico.

5. Se introduce la porción de muestra a pulverizar previamente triturada, y se repiten los pasos anteriores.

Para los análisis de fluorescencia de difracción de rayos X se tomó una pequeña porción (20 gramos aproximadamente) y se colocó en un portamuestra, el cual consta de dos cilindros plásticos (ver figura 1.5). Una película de Maylar de 0.02  $\mu$  de espesor es colocada entre los dos cilindros, esta película es usada como protección de la muestra para no ser contaminada, así como para impedir el contacto directo con el equipo.

A cada muestra ya preparada se le propinaron pequeños golpes para compactar la muestra y permitir que la misma estuviera de manera compacta y uniforme. Para cada muestra fue necesario el uso de un portamuestra, el cual después usado se limpiaba con alcohol y papel absorbente. La película de Maylar solo era usada una vez, por lo cual después de analizada cada muestra se desechaba.

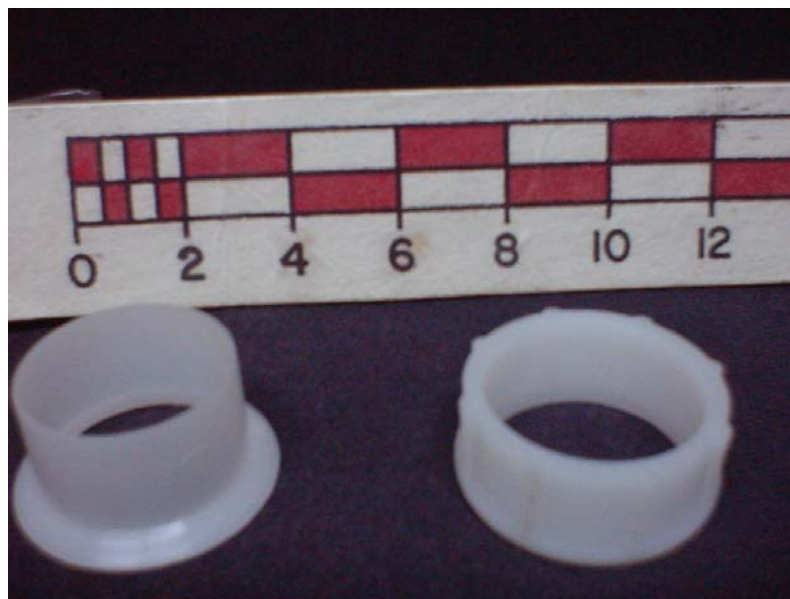


Figura 1.5. Portamuestra usado para los análisis químicos.

Esta técnica de preparación de muestras ha sido utilizada en los trabajos previos de Camposano y Martínez (2000), Rodríguez *et al.* (2000), González y Sánchez (2001), Noguera y Yopez (2002), Bermúdez *et al.* (2003), entre otros.

Para los análisis de carbono total, se tomó una pequeña fracción de muestra (15 mg aproximadamente) y se colocó en una pequeña navetilla de cerámica, la cual después de usada se limpiaba con alcohol para eliminar cualquier resto de muestra.

#### Análisis químicos:

Para la realización de los análisis químicos se utilizaron las técnicas de fluorescencia por dispersión de rayos X, y la determinación de carbono total por combustión.

La fluorescencia por dispersión de rayos X es una de las técnicas analíticas más sencillas, precisas y económicas para la determinación de la composición química de muchos tipos de materiales. Es una técnica no destructiva y confiable, que requiere de una simple preparación de la muestra y se adapta para sólidos, líquidos y polvos. Puede ser usada para un gran rango de elementos, y provee límites de detección a niveles de sub-ppm; también puede medir concentraciones de hasta 100% de manera simultánea (<http://www.spectro-ai>, 2003).

Para llevar a cabo esta técnica se utilizó un espectrómetro marca Phillips (Minipal PW4025/00) (ver figura 1.6). Este espectrómetro trabaja con un *software* bajo ambiente *windows*, que permite realizar las diferentes aplicaciones según lo requieran los análisis. Su sistema de flujo y el detector de alta resolución hacen al Minipal una herramienta de análisis cuantitativo y cualitativo de alta precisión ([www.ifpac.com](http://www.ifpac.com), 2003).





Figura 1.6. Espectrómetro Phillips (Minipal PW4025/00)

En el caso específico del análisis de las muestras de la sección superior de la Formación El Paraíso, se analizaron los siguientes elementos, expresados en sus óxidos más comunes:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Así mismo se analizó el elemento traza V (ppm).

La estructura del Minipal, así como el establecimiento de condiciones óptimas para la medición (creación de aplicaciones), están explicadas en Camposano & Martínez (2000).

La determinación de carbono total, es una técnica analítica y 100% eficaz según el principio de coulombimetría. Además, es de amplio rango lineal y de sencilla aplicación. Dicha técnica se aplicó mediante el uso de un analizador coulombimétrico de carbono marca *UIC Coulometrics* (ver figura 1.7), el cual trabaja con una sensibilidad inferior a 0.1 microgramo de carbono.

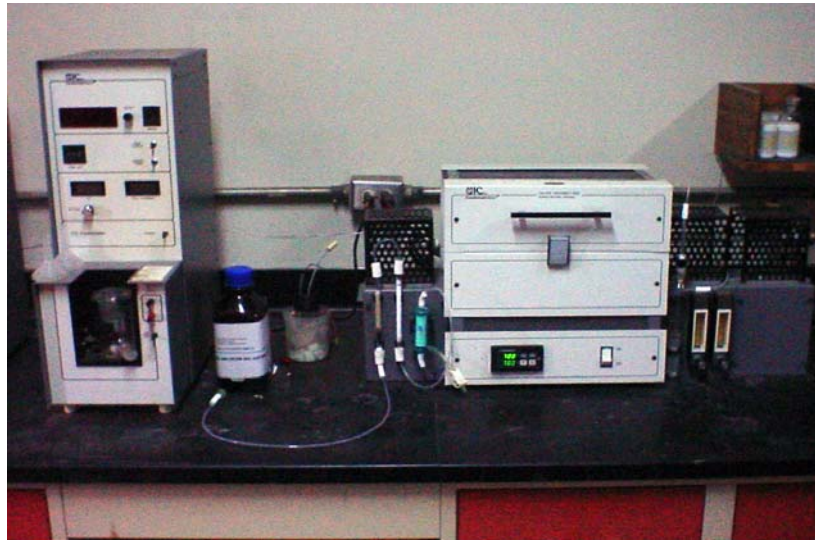


Figura 1.7. Analizador coulombimétrico de carbono marca *UIC Coulometrics*.

### Análisis Petrográfico:

Se realizó el análisis petrográfico a 3 secciones finas de areniscas características de la secuencia en estudio. Este análisis arrojó características tales como mineralogía presente en la roca, porosidad, tamaño de grano, escogimiento y cemento presente.

Para la realizar el análisis petrográfico se utilizó un microscopio binocular con cámara fotográfica incorporada bajo luz blanca transmitida.

En base a los datos obtenidos se clasificaron las areniscas según los criterios de clasificación de Pettijohn *et al.* (1972).

### **Fase de procesamiento de datos**

La fase de procesamiento de datos fue dividida en 4 partes:

- Procesamiento e interpretación de los análisis químicos.

- Definición, análisis e interpretación de facies.
- Elaboración de la columna estratigráfica.
- Elaboración del mapa geológico de la sección en estudio.

#### Procesamiento e interpretación de los análisis químicos:

Esta etapa se basa en el análisis estadístico de los datos obtenidos a partir de las muestras tomadas de la Formación El Paraíso, así como también en la construcción de perfiles de concentración vs. posición estratigráfica (perfiles de distribución). Una vez realizados los análisis estadísticos se procedió a interpretar los mismos.

Estadísticamente los datos fueron analizados con el programa JMP 4.0.4, el cual es una unidad de SAS Institute Inc. Con este *software* fue posible realizar todos los análisis de los datos obtenidos a partir de los análisis químicos.

#### Definición, análisis e interpretación de litofacies:

Durante esta etapa se definieron las litofacies características del área de estudio en base a la litología, textura y estructuras sedimentarias presentes. Una vez definidas y analizadas las litofacies se realizó la asociación de las mismas para la posterior interpretación de ambientes y subambientes de depositación de la secuencia en estudio.

#### Realización de la columna estratigráfica:

Para llevar a cabo la realización de la columna estratigráfica fue necesario realizar la corrección de espesores para una mejor precisión. Para dichas correcciones se utilizó

el programa Geologic Calculator, el cual a partir de los datos obtenidos en campo arrojaba como resultado los espesores verdaderos.

Una vez corregidos los espesores, se construyó la columna estratigráfica con el uso del *software* Applecore 0.7.f. Posterior a la construcción de la columna, se realizó la edición de la misma mediante el programa Canvas 7.0, el cual permitió ajustar detalles que no son posibles realizar con el Applecore.

#### Elaboración del mapa geológico de la sección en estudio:

En esta etapa se procedió a graficar los datos obtenidos en campo, en el mapa previamente digitalizado durante la fase de pre-campo. Estos incluye: rumbo y buzamiento de los paquetes litológicos, poligonal de los afloramientos, ubicación de muestras y vías de acceso.

Para la elaboración de dicho mapa fue necesario el uso del *software* Autodesk Autocad versión 2002.

---

---

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### ANÁLISIS QUÍMICOS

Para la realización de los análisis químicos se utilizaron las técnicas de fluorescencia por dispersión de rayos X, y la determinación de carbono total por combustión.

#### **Fluorescencia por dispersión de rayos X**

Esta tecnología provee una de las técnicas analíticas más sencilla, precisa y económica para la determinación de la composición química de muchos tipos de materiales. Es una técnica no destructiva y confiable, que requiere de una simple preparación de la muestra y se adapta para sólidos, líquidos y polvos. Puede ser usada para un gran rango de elementos, y provee límites de detección a niveles de sub-ppm; también puede medir concentraciones de hasta 100% de manera simultánea (Panalytical, 2003).

Esta técnica funciona cuando los átomos en una muestra son irradiados con fotones de Rx primarios de alta energía, los electrones son expulsados en forma de fotoelectrones. Esto crea “huecos” en el electrón en uno o más orbitales, convirtiendo los átomos en iones, los cuales son inestables (Panalytical, 2003).

Para restaurar los átomos a un estado más estable, los huecos en los orbitales internos son rellenados por electrones de los orbitales externos. Tales transiciones pueden estar acompañadas por una emisión de energía en forma de un foton de rayo-x secundario, un fenómeno conocido como fluorescencia (Panalytical, 2003).

Los diferentes orbitales de electrones son llamados K, L, M, etc., donde K es el más cercano al núcleo. Cada uno corresponde a un nivel de energía, y la energía E los fotones fluorescentes emitidos es determinada por la diferencia de energías entre los orbitales finales e iniciales para las transiciones individuales (Panalytical, 2003). Esto es descrito por la fórmula:

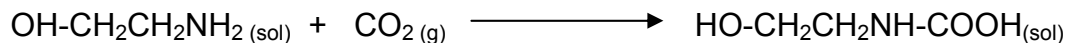
$$E = hc / \lambda$$

donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y lambda es la longitud de onda del fotón. Las longitudes de onda son entonces inversamente proporcionales a las energías, y son características de cada elemento. Adicionalmente, la intensidad de la emisión, la cual es proporcional a la concentración del elemento responsable en una muestra, es recalculada internamente a partir de una serie de curvas de calibración y puede ser mostrado directamente en unidades de concentración (Panalytical, 2003).

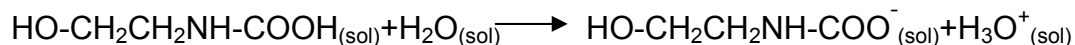
### **Análisis de carbono total**

Para la determinación del porcentaje de carbono total se utilizó un analizador coulombimétrico de carbono marca *UIC Coulometrics*. Se pesó 15 mg de muestra aproximadamente, en una pequeña navecilla de cerámica. La navecilla conteniendo la muestra se introdujo en un horno, a la temperatura de 950°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 varias reacciones químicas que buscan asegurar: que se oxide a CO<sub>2</sub> cualquier monóxido que eventualmente pudiera formarse (con cromato de bario); y eliminar los óxidos de azufre y nitrógeno (con dióxido de manganeso y dicromato soportado sobre sílice) (Martínez, 2004).

Martínez (2004), indica que luego de estos procesos previos, el CO<sub>2</sub> generado es burbujado sobre una solución de dimetilsulfóxido que contiene monoetanolamina. En el seno de la celda columbimétrica tiene lugar la reacción:

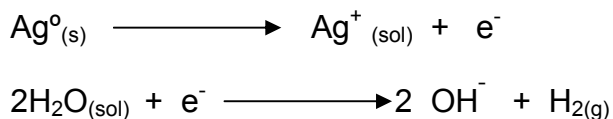


El ácido carbónico formado se disocia en su forma iónica:

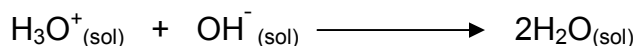


Así mismo, Martínez (2004), señala la importancia del hecho que las reacciones se llevan a cabo en medio no acuoso (dimetilsulfóxido), por lo que el agua se halla disuelta en el medio orgánico.

Los iones hidronio ocasionan un cambio en el viraje del indicador timolftaleina, presente en la solución del cátodo, de azul a amarillo tenue. Al cambiar la absorbancia de la solución, inmediatamente tiene lugar la generación de electrones en la celda columbimétrica y en el ánodo de plata tiene lugar la semireacción:



En la celda tiene lugar ahora la reacción de neutralización de los iones hidronio generados por el ácido carbámico derivado del CO<sub>2</sub> con los OH<sup>-</sup> producidos:



El consumo de electrones en la celda es directamente proporcional al número de moles de CO<sub>2</sub> generado por la combustión de la muestra (a través de la constante de Faraday), y por consiguiente, existe un factor estequiométrico sencillo que relaciona

el número de electrones generados con la masa de carbono total presente en la muestra (Martínez, 2004).

Por último, Martínez (2004) explica que la señal obtenida en la pantalla del dial del equipo indica los microgramos de carbono encontrados en la muestra, por lo que el porcentaje de carbono total en la muestra (% CT) sería:

$$\%CT = \frac{\text{microgramos carbono}}{\text{microgramos muestra}} * 100$$

## **GEOQUÍMICA DE ROCAS SEDIMENTARIAS**

La geoquímica se basa en el estudio de la abundancia, distribución y migración de los elementos químicos e isótopos en la Tierra. La abundancia y distribución de dichos elementos depende de sus propiedades físicas y químicas. Los datos geoquímicos frecuentemente son usados para obtener información de los procesos geológicos que han afectado a rocas ígneas, metamórficas y/o sedimentarias.

Mason y Moore (1982), realizaron una división de rocas en base a la composición de elementos mayoritarios de un gran número de rocas (ver cuadro 2.1). A pesar de la relación existente entre la mineralogía y la composición, no es recomendable realizar interpretaciones de areniscas usando solo análisis químicos.

A pesar de la clasificación de Mason y Moore, muchos valores de las rocas sedimentarias no están bien definidos, lo cual hace muy difícil la clasificación de las rocas sedimentarias en base a los elementos mayoritarios a diferencia de las clasificaciones hechas de rocas ígneas.



Cuadro 2.1. Composición química promedio de las rocas sedimentarias (Tomado de Mason &amp; Moore, 1982).

ÓXIDO	ROCAS ÍGNEAS	LUTITAS	ARENISCAS	CALIZAS
SiO <sub>2</sub> (%)	59,14	58,10	78,33	5,19
TiO <sub>2</sub> (%)	1,05	0,65	0,25	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	15,34	15,40	4,77	0,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,88	6,47	1,37	0,50
MgO (%)	3,49	2,44	1,16	7,89
CaO (%)	5,08	3,11	5,50	42,57
Na <sub>2</sub> O (%)	3,84	1,30	0,45	0,05
K <sub>2</sub> O (%)	3,13	3,42	1,31	0,33
H <sub>2</sub> O (%)	1,15	5,00	1,63	0,77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,30	0,17	0,08	0,04
CO <sub>2</sub> (%)	0,10	2,63	5,03	41,54
SO <sub>3</sub> (%)	----	0,64	0,07	0,05
BaO (%)	0,06	0,05	0,05	----
C (%)	----	0,80	----	----

Los análisis petrográficos son necesarios para determinar cuales minerales son detríticos, cuales son autigénicos, y cuales son cementos. La mayoría de los óxidos pueden ser contribuidos por muchos minerales diferentes, y los estudios microscópicos deben ser hechos para determinar cuales minerales están actualmente presentes.

La comparación de análisis químicos de diferentes rocas debe ser hecha con sumo cuidado, ya que la composición química de las areniscas o lutita estas relacionada con su tamaño de grano.

Noguera y Yépez (2002), explican que en años recientes se ha introducido una nueva herramienta en el campo de la caracterización de formaciones de sedimentos terrígenos, que permiten en base a la información geoquímica establecer un esquema

de clasificación de areniscas y lutitas que difiere mucho de los anteriores esquemas elaborados en base a la clasificación petrográfica como las de Dott (1964); Folk (1968) y Pettijohn *et al.* (1972), donde a veces ocurren ambigüedades por la matriz, los fragmentos líticos o por no poder establecer adecuadamente los límites composicionales exactos en estos esquemas.

Herron (1988) realiza un esquema basado en las concentraciones químicas para clasificar areniscas y lutitas usando los logaritmos naturales de las relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ ; y las concentraciones de Ca (ver figura 2.1). Esta caracterización resulta beneficiosa en la correlación de pozos, interpretación de los ambientes de depositación, evaluación de la calidad de reservorio, análisis del marco tectónico y en general a la geología de subsuelo.

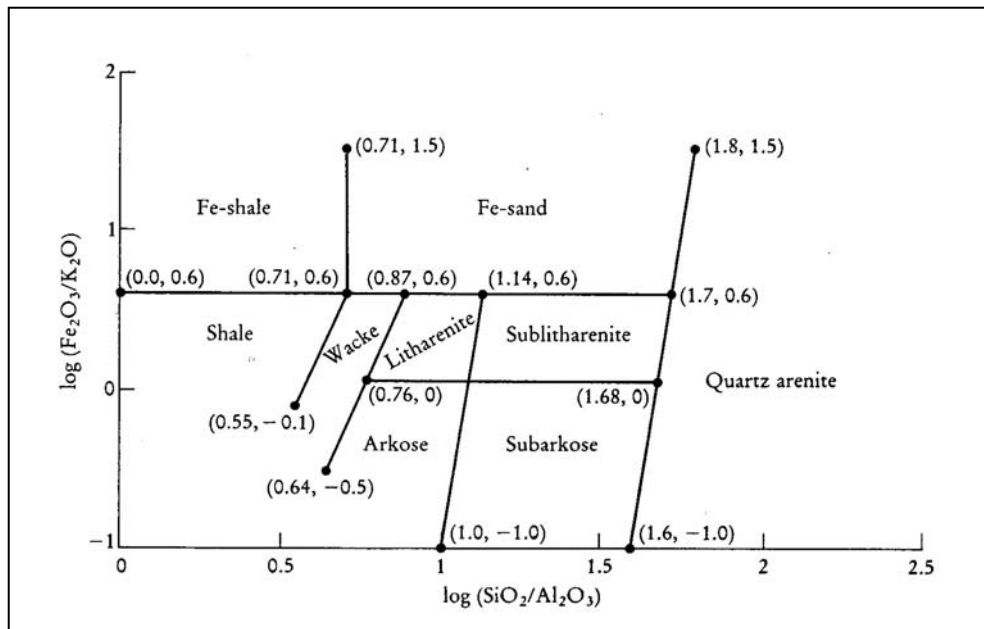


Figura 2.1. Sistema de clasificación de sedimentos terrígenos (Tomado de Herron, 1988).

La relación de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ha sido descrita como un indicador de madurez mineralógica (Pettijohn *et al.*, 1972). La relación de hierro total, expresada como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y  $\text{K}_2\text{O}$  son efectivos en distinguir fragmentos líticos de feldespatos en una amplia variedad de areniscas. La relación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  puede ser expresada como un indicador de estabilidad mineralógica (Herron, 1988).

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

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

Herron también incluye un tercer eje, del total de Ca, el cual no se muestra en la figura 2.1. Este eje divide las muestras en el sistema de clasificación de areniscas en no calcáreas ( $\text{Ca} < 4\%$ ), calcáreas ( $4\% < \text{Ca} < 15\%$ ), y carbonáticas ( $\text{Ca} > 15\%$ ). La calcita y dolomita son importantes componentes diagénéticos de areniscas y éstas no pueden corresponder apropiadamente en un sistema de clasificación de areniscas. Este eje es incluido porque la cementación carbonática tiene importancia para la formación de propiedades tales como porosidad, permeabilidad y dureza de la roca.

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

A pesar que varias de las categorías mostradas en la figura 2.1 (cuarzoarenita, subarcosa, sublitarenita, litarenita y waca) siguen el esquema de clasificación de areniscas de Dott (1964), Folk (1968) y Pettijohn *et al.*, (1972), tres categorías adicionales son incluidas. La lutita, no presentada en el esquema geoquímico de Pettijohn *et al.*, (1972), es distinguida de la waca principalmente por una relación baja de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Las muestras con muy alta relación  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  ( $> 4$ ) son clasificadas como ricas en hierro o ferruginosas, y más allá en pobres condiciones como arenitas ricas en Fe (ricas en glauconita) o lutitas ricas en Fe (conteniendo abundante pirita o siderita) en base a la relación de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Herron, 1988).

La geoquímica, puede ser usada en rocas sedimentarias para entender las rocas tanto clásticas como químicas, sin embargo debido a la cantidad de procesos que afectan a las rocas sedimentarias, estas son consideradas como las más complejas de estudiar. Es necesario tener en cuenta todos los cambios químicos que incluyen erosión, transporte, depositación, diagénesis, litificación y en algunos casos los cambios posteriores a la litificación.

A pesar de los procesos antes mencionados que afectan a las rocas sedimentarias, la composición química de la fuente es el principal factor que controla la composición química de la misma. Sin embargo este puede ser afectado notablemente por los subsecuentes procesos.

Los procesos erosivos que afectan a las rocas pueden ser estudiados a través de la geoquímica. Algunos estudios geoquímicos son capaces de demostrar las condiciones de erosión de la roca fuente. Al igual que la erosión, el transporte también puede generar cambios notables, sin embargo esto parece tener relación con el tiempo que transcurre desde que ocurre la erosión hasta el momento de ocurrir el transporte.

Además de los procesos ya mencionados existe un conjunto de variables que de una u otra forma afectan los porcentajes de óxidos presentes en las rocas sedimentarias. El ambiente tectónico, así como las características físico-químicas del ambiente durante los procesos de depositación, soterramiento, diagénesis y litificación.

Rollinson (1993), se basa en que los procesos de tectónica de placas, imparten unas características geoquímicas distintivas a los sedimentos de dos maneras diferentes. Principalmente, los diferentes ambientes tectónicos tienen características de procedencia distintivas, y en segundo lugar, los sedimentos están caracterizados por los procesos sedimentarios que afectan a los mismos.

Bhatia (1983), propone un diagrama de clasificación de ambientes tectónicos basado en un gráfico de funciones discriminantes de un análisis de elementos mayoritarios de 69 muestras de areniscas del Paleozoico. Las areniscas fueron escogidas para representar 4 ambientes tectónicos diferentes, los cuales fueron asignados en base a comparaciones con ambientes modernos. Para corroborar los resultados, los cuatro campos definidos fueron probados con sedimentos modernos recolectados de ambientes tectónicos conocidos.

Este diagrama es utilizado para sedimentos clásticos, sin embargo cuando es usado en sedimentos con alto contenido de CaO, como los carbonatos, debe ser corregido para el contenido de carbonato. Haughton (1988), y Winchester y Max (1989) realizaron estudios en carbonatos, y encontraron que el diagrama confundía sus sedimentos.

## TRABAJOS PREVIOS

En los últimos años se han realizado una gran cantidad de trabajos en el campo de la geoquímica, su valioso uso como herramienta para caracterizar y correlacionar secciones estratigráficas ha hecho que sea un campo de interés para muchos científicos alrededor del mundo. A continuación mencionaremos los trabajos utilizados, tanto a nivel internacional como a nivel nacional.

Ai-Gailani (1980) realizó una identificación de discordancias en muestras de núcleos procedentes de Irak e Inglaterra, con la aplicación de las técnicas de fluorescencia de rayos X, así como también estudios petrográficos y microscopía. En este trabajo se utilizaron nueve variables químicas para determinar cambios mineralógicos en las cercanías de las discordancias, permitiendo así identificar las mismas.

Hill (1990) estudió la distribución vertical de elementos en unas capas de carbones dentro de una secuencia estratigráfica en Hat Creek, British Columbia.

Coradossi *et al.* (1991) realizaron análisis químicos y mineralógicos de más de 100 muestras de rocas sedimentarias de la cuenca Marcheian Outer (Macerata, Italia centro-oriental) para la determinación de cambios causados por diferencias de profundidad y de episodios de evaporación-precipitación.

Murray y Leinen (1993) evaluaron la relación existente entre las diferentes vías por las cuales son transportados los elementos traza hacia el fondo marino del Pacífico Ecuatorial, realizando análisis de elementos mayoritarios, trazas y tierras raras en sedimentos superficiales mediante comparaciones con los flujos de  $\text{CaCO}_3$ , ópalo y Corg.

Murray *et al.* (1993) realizaron análisis químicos de Al y Ti a sedimentos superficiales para determinar la cantidad de Al que se acumula bajo la zona de elevada productividad en el Océano Pacífico Ecuatorial.

Rodríguez *et al.* (2000) caracterizaron química y radiométricamente secciones estratigráficas de la Formación Guárico en el estado Cojedes, como parte del proyecto del CONICIT “Caracterización química y radioisotópica de secciones estratigráficas como herramienta de correlación geológica”.

Camposano y Martínez (2000) realizaron la caracterización química y radiométrica de secciones estratigráficas pertenecientes a las Formaciones Barco y Mirador en el estado Táchira, Venezuela Occidental, también perteneciente al proyecto del CONICIT antes mencionado.

González y Sánchez (2001) realizaron la caracterización química y radiométrica de dos secciones estratigráficas pertenecientes a la Formación La Luna (sección La Ortiza y Las Delicias). Al igual que los dos anteriores es parte del mismo proyecto.

Noguera y Yépez (2002) presentan la caracterización química de las secciones estratigráficas de las Formaciones Naricual y Querecual, en los estados Anzoátegui y Monagas. Este trabajo es parte del proyecto del CONICIT antes mencionado, y continua con el uso de la quimioestratigrafía como herramienta.

Bermudez *et al.* (2003) estudiaron las Litofacies, Quimioestratigrafía y Ciclicidad de La Formación Cerro Pelado, como herramienta para determinar posibles características de potencialidad generadora y/o almacenadora en la quebrada La Paloma. Este trabajo es el primero en rocas sedimentarias del Proyecto UCV-VIPA, haciendo uso de la quimioestratigrafía como herramienta.

Baritto (2003) caracterizó químicamente muestras de sedimentos superficiales de núcleos de la fachada atlántica venezolana y realizó análisis químicos en base a elementos mayoritarios y elementos trazas para definir unidades químicas.

Cedillo y Olaya (2003) realizaron la caracterización química y radiométrica de sedimentos de una zona ubicada al noreste del delta del río Orinoco en el océano Atlántico, Venezuela, utilizando análisis químicos y radiométricos en muestras de núcleos para definir unidades químicas y ambientes.

Chacín (2003) en su estudio sobre caracterización química y radiométrica de muestras de canal correspondientes a 4 pozos del campo petrolífero La Concepción, estado Zulia, realiza análisis químicos y radiométricos en muestras de núcleos, para definir facies químicas, al igual que Cedillo & Olaya

Debido a la gran cantidad de afloramientos de rocas sedimentarias del Terciario en la cuenca central de Falcón, los geólogos se interesaron en realizar estudios desde los primeros días de la exploración petrolera (Díaz de Gamero, 1977). La primera referencia bibliográfica publicada fue hecha por Wiedenmayer en 1924. Posterior a este autor, aparecen las publicaciones de Garner y Hodson en el año de 1926.

A continuación se presentan los trabajos más resaltantes realizados en la parte central de la cuenca de Falcón:

Hodson (1926) describió originalmente las Lutitas de El Paraíso, textualmente, como lutitas negras con intercalaciones de capas de carbón y areniscas cuarcíticas, con localidad tipo en El Paraíso, quebrada El Paraíso, distrito Bolívar, estado Falcón.

Liddle (1928) hace una descripción más completa de la unidad, y la considera equivalente a la parte superior de la Formación Misoa-Trujillo, de Venezuela occidental, de edad Eoceno.



Gravell (1933) la llama serie Paraíso, y le asigna una edad Eoceno Medio y Tardío, en base a algunos foraminíferos.

Senn (1935) correlaciona los estratos de El Paraíso con la parte superior de la Formación Misoa-Trujillo superior, de edad Eoceno Medio-Tardío. Senn (1940), correlaciona los estratos de El Paraíso con las cuarcitas de El Mojino y las coloca por debajo de las lutitas de Tupure.

Sutton (1946) correlaciona a la Formación El Paraíso con las formaciones Omuquena y Mene Grande, del Eoceno Tardío.

Liddle (1946) repite las descripciones e interpretaciones de su trabajo anterior, indicando que la unidad se conoce localmente con el nombre de cuarcitas de El Mojino (Gravell, 1933, citado por Díaz de Gamero, 1977).

Rivero (1956) opina que la Formación El Paraíso, es equivalente a las cuarcitas de El Mojino de Halse (1937), y las areniscas de San Juan de la Vega de Senn (1935), con la cual deben incluirse todas bajo el primer nombre, ya que tiene prioridad, y se considera que la edad de esta formación es Oligocena.

Wheeler (1960, 1963) suministra descripciones detalladas de esta formación, dentro de la cual incluye las areniscas de San Juan de la Vega, colocándola por lo tanto en la parte inferior del Grupo Mitare de Mencher *et al.*, (1951).

Coronel (1970) indica que en la parte central de la cuenca, la Formación El Paraíso esta intrusionada por una serie de cuerpos ígneos de naturaleza basáltico.

Hunter y Ferrell (1972) demuestran la no equivalencia de las areniscas de San Juan de la Vega y La Formación El Paraíso, separadas por una gruesa sección lutítica.

Díaz de Gamero (1977) estudia 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, termino que propone eliminar de la literatura estratigráfica.

Muessig (1978) realizó un estudio de las intrusiones de edad Oligoceno-Mioceno de las rocas ígneas en la parte central de Falcón.

Muessig (1984) hace estudios de la estructura y tectónica de edad Cenozoico de la cuenca de Falcón. Además realiza estudios de paleomagnetismo de las intrusiones ígneas de la parte central de la cuenca de Falcón.

Macellari (1995), realizó estudios en el centro de la cuenca de Falcón y en ellos habla de la Formación El Paraíso, su sedimentación y su variedad de facies litológicas.

Díaz de Gamero (1996) realizó estudios paleontológicos y estratigráficos, y actualiza datos sobre esta formación.

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

---

---

## CAPÍTULO III

### MARCO GEOLÓGICO

#### GEOLOGÍA REGIONAL

##### Generalidades

La región Falconiana, exceptuando a la península de Paraguaná, se subdivide fisiográficamente en cuatro fajas longitudinales aproximadamente paralelas a la costa norte, y que son de norte a sur: la llanura costera, la serranía de San Luis y sierras asociadas al oeste, la llanura central o depresión de Pecaya y la cordillera de Churuguara (González de Juana *et al.*, 1980).

La cuenca de Falcón abarcó una gran porción de la parte noroccidental de Venezuela durante el Oligoceno y Mioceno Temprano, y durante estos períodos fue principalmente una cuenca marina rodeada por zonas emergidas, excepto al este y completamente hacia el norte (Audemard, 1997 y Muessig, 1984).

Esta región abarca actualmente una extensión geográfica de 35.000 km<sup>2</sup> aproximadamente y un volumen de sedimentos de 161.000 km<sup>2</sup>. Posee su mayor longitud entre La Victoria y Boca Tocuyo, aproximadamente 320 km, y su mayor anchura se ubica entre la ensenada de La Vela de Coro y Churuguara, alcanzando unos 100 km (González de Juana *et al.*, 1980).

Los límites son al occidente con la cuenca del Lago de Maracaibo, al norte y este por la línea de costa del Golfo de Venezuela, su prolongación, el Golfete de Coro, por el Istmo de Los Medanos y por la costa del Atlántico hasta el Golfo Triste y al sur por una serie de elevaciones denominadas Sierra de Churuguara. La cuenca se prolonga hacia el norte y noreste dentro de las aguas territoriales de Venezuela, en el mar Caribe (ver figura 3.1) (González de Juana *et al.*, 1980).

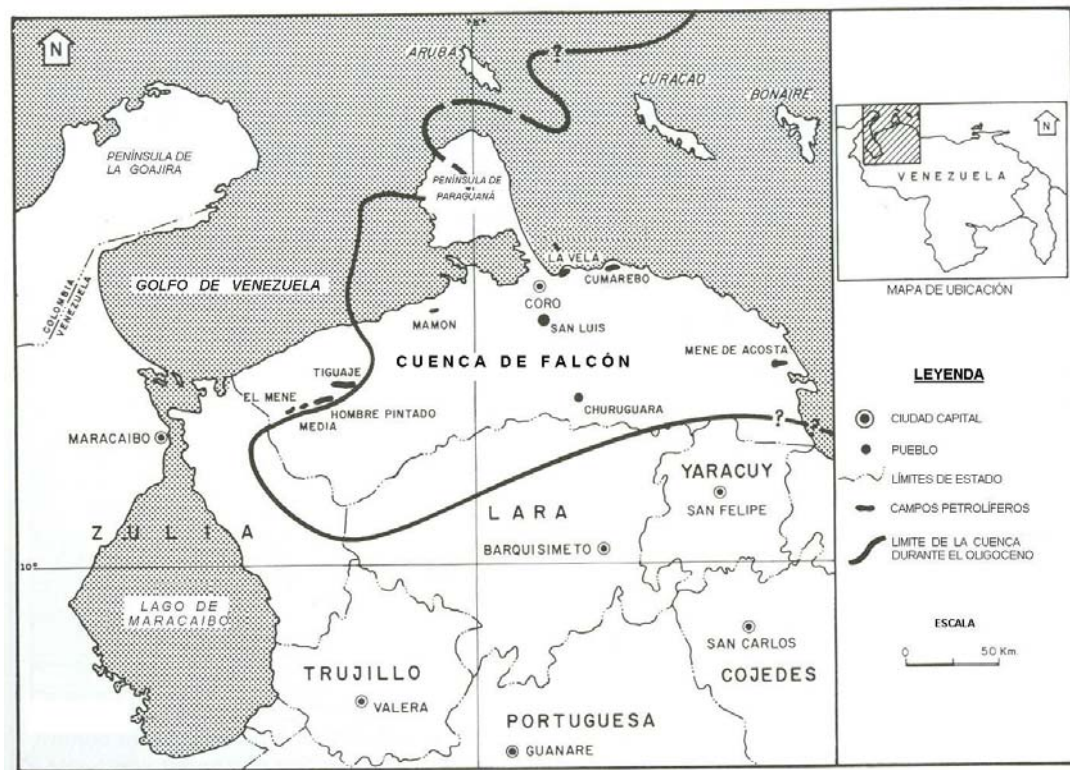


Figura 3.1 Ubicación de la Cuenca de Falcón y sus límites. Tomado y modificado de Boesi y Godard (1991)

### Estratigrafía y sedimentación de la cuenca

En Venezuela noroccidental, específicamente en la región de Falcón, durante el Eoceno Tardío se presenta un período de erosión, por esta razón no aflora un gran número de secuencias de este período. Solo en el extremo oriental de esta cuenca se conocen algunos afloramientos con grandes contenidos de foraminíferos planctónicos, que sirven para indicar la presencia del Eoceno Tardío (Hunter, 1974) que representa la secuencia inicial del para-autóctono (González de Juana *et al.*, 1980).

González de Juana *et al.* (1980), explican que el relleno de la cuenca de Falcón durante el ciclo Terciario Superior representa la sedimentación para-autóctona, que se desarrolló en forma máxima durante el Oligoceno y Mioceno sobre un alóctono

emplazado en el borde septentrional de la plataforma epicontinental, cercana al extremo noroeste de los Andes Venezolanos.

La sedimentación de esta cuenca se mantuvo continua y en éstas afloran depósitos que abarcan desde el Eoceno Superior hasta el Cuaternario, solo presentando tres eventos de discordancias angulares que tienen significado regional. Esta cuenca fue intensamente plegada y tectónicamente invertida durante el Mioceno Medio y Tardío, por esta razón el proceso sedimentario se restringió básicamente al flanco norte del anticlinorio de Falcón (Audemard, 1997).

Al desarrollar este capítulo se harán descripciones acerca de las diferentes formaciones que componen la cuenca de Falcón, desde su parte central, oriental, occidental y costera, con la intención de proporcionar una breve reseña histórica, litológica y estratigráfica de las diferentes unidades que la componen.

El formato de este capítulo se basará en la descripción por edades de las diferentes unidades, desde las más antiguas hasta las más recientes según su depositación. Solo se realizará una descripción más profunda en aquellas formaciones que tienen relación directa con el área de estudio, como es el caso de la Formación El Paraíso, Formación Jarillal, y la Formación Pecaya, estas dos últimas en contacto con la Formación El Paraíso.

Otro aspecto a tomar en cuenta en este capítulo son las rocas ígneas que se encuentran aflorando en el centro de la cuenca y que de alguna manera tienen relación con la zona en estudio.

### Eoceno Medio y Tardío:

El Eoceno en Falcón se conoce desde 1938, referido por González de Juana. El mismo aflora en la parte occidental, más específicamente en los cerros del Tacal. De igual manera se conocen afloramientos de este período en Falcón oriental sobre el Alto de Guacharaca, y en la Sierra de Churuguara, donde se encuentra la sección tipo de las formaciones Santa Rita y Jarillal, las cuales se atribuyen al Eoceno Medio (González de Juana *et al.*, 1980).

La sedimentación de la cuenca de Falcón empezó a finales del Eoceno Medio en el oeste de Falcón, y a finales del Eoceno Temprano en la parte este. Los sedimentos que se encuentran relacionados con la formación inicial de la cuenca en el oeste se encuentran representados por el Grupo Agua Negra durante la parte superior del Eoceno. Este grupo se compone por las formaciones Santa Rita, Jarillal y La Victoria (González de Juana *et al.*, 1980).

La Formación Santa Rita presenta entre 400 y 500 metros de espesor, con la presencia de conglomerados, areniscas y margas con intercalaciones de lutitas. Este contacto inferior no se encuentra expuesto, pero está en contacto de falla con el Eoceno Superior (González de Juana *et al.*, 1980).

Sobre estos estratos de la Formación Santa Rita se encuentra concordante la Formación Jarillal o lutitas de Jarillal, la cual se depositó durante una extensa transgresión hacia el oeste-suroeste de la cuenca de Falcón (Macellari, 1995).

El nombre de lutitas de Jarillal se propone con la intención de diferenciar la parte media de la Formación (hoy Grupo) Agua Negra, de los conglomerados de Santa Rita, infrayacente, y las capas de Churuguara, suprayacentes. Senn (1935) subdividió a la Formación Jarillal en una parte basal que llamó lutitas de *Raetomya* del Eoceno Tardío y una parte superior, aparentemente fosilífera y de edad Oligoceno Temprano,

en la cual posteriormente Wheeler (1960) reconoció foraminíferos del Eoceno Tardío. Guevara (1967) incluyó en esta formación a las calizas de Churugarita (Garner, 1926) y Piedras Blancas (Raadshoven Van, 1951) como miembros locales (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La sección tipo según Guevara (1967), es el intervalo de lutitas a lo largo de la carretera vieja Piedra Grande-Baragua, cerca del caserío Jarillal, 10 km al noreste de Baragua, y al sur de la sección tipo de la Formación Santa Rita (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999). Senn (1935) describe una secuencia lutítica más o menos arenosa, siendo los primeros 50 metros muy fosilíferos, mientras que hacia el tope de la localidad tipo son lutitas estériles. En la sección de cerro Los Indios aparecen lechos de calizas, esporádicas en arcillas abigarradas. Así mismo, Guevara (1967) mencionó en la región de Paloma Alta la presencia de lutitas de diferentes colores, con capas de areniscas más o menos conglomeráticas y calizas (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Hacia la base de esta unidad se encuentran areniscas calcáreas de grano grueso con frecuencia ferruginosas. Localmente las calizas son muy prominentes, como es el caso en el área de Churugarita. Estas calizas están intercaladas con lutitas arenosas y capas delgadas de areniscas de grano fino a medio. Pitteli y Molina (1989) describen una secuencia monótona de lutitas, hasta un 90% de la formación, y algunos intervalos delgados de areniscas y calizas lodosas hacia la base. La parte basal se caracteriza por una alternancia de areniscas calcáreas micáceas de grano fino a muy fino, moderadamente escogidas. Ocasionalmente a través de este intervalo se encuentran gránulos de cuarzo, chert y fragmentos ferruginosos (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Senn (1935) registra 375 metros de espesor para la localidad tipo, mientras que Guevara (1967), estimó unos 450 y 775 metros en las secciones de referencia en la región de Paloma Alta. González de Juana (1951), indica un espesor de 2000 metros,

y en la sección del río Capazón (noreste del Macizo de Avispa), apenas de 100 metros (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La Formación Jarillal, según Guevara (1967), es en su sección tipo concordante y transicional sobre la Formación Santa Rita. En otras localidades descansa discordante sobre las formaciones Paují y Misoa, mientras que en su parte superior es concordante y transicional con la Formación La Victoria. Wheeler (1963) señaló un contacto superior concordante con la Formación Churuguara (González de Juana *et al.*, 1980).

A esta formación se le asigna una edad en base a la fauna y la flora, la cual va desde el Eoceno Medio tardío a Eoceno Tardío temprano. Esta se encuentra en la zona de *Truncorotaloides rohri*, (Hunter, 1974; Pitelli y Molina, 1989); zonas palinológicas *Retitricolporites guianensis a Janmulleripollis pentaradiatus* (Muller *et al.*, 1987; Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La Formación Jarillal representa el alcance máximo de la transgresión que comenzó localmente con la Formación Santa Rita (Guevara, 1967), siendo un ambiente litoral a nerítico interior, alcanzando condiciones marinas abiertas relativamente profundas. Pitelli y Molina (1989) la describen como una formación depositada en un ambiente marino a una paleoprofundidad entre 100 y 200 metros, representando un máximo transgresivo y el inicio de un ciclo regresivo (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La parte superior del Grupo Agua Negra está representado por la Formación La Victoria, que se compone por unos 2400 metros de lutitas negras con areniscas interbandeadas y carbón (Sutton, 1946 y Guevara, 1967). Esta unidad fue predominantemente depositada en un ambiente lacustrino con incursión de agua salobre (González de Juana *et al.*, 1980).



En el este de Falcón, las rocas del Eoceno tienen más de 400 metros de espesor, y éstas presentan las lutitas oscuras calcáreas y lutitas grises a negras fosilíferas de la Formación Cerro Misión. Esta formación se encuentra discordante sobre las rocas del Eoceno Medio (Renz, 1948, citado por Macellari, 1995).

Durante el Eoceno Medio, se presentó una extensa transgresión hacia el oeste-suroeste, que tiene su mejor representación en la Formación Jarillal. Por su parte, la Formación La Victoria presenta características regresivas, lo que puede ser visto como el posible antecedente del levantamiento y erosión característicos del Eoceno Tardío (Macellari, 1995).

#### Oligoceno- Mioceno Temprano:

La sedimentación en la depresión de Falcón durante el Oligoceno Temprano se encuentra definida por un conjunto de rocas que formaron una *suite* de facies bastante características, depositadas durante una transgresión marina (ver figura 3.2), la cual fue interrumpida por una regresión que se produjo en el límite del Oligoceno y Mioceno. Este mismo autor refiere que el episodio regresivo se encuentra representado por un piso extendido de clastos granulares. Estas rocas se encuentran bien expuestas en el anticlinorio de Falcón, y se depositaron al oeste sobre estratos del Eoceno, en rocas metamórficas cretáceas al este, y sobre las turbiditas del Paleoceno-Eoceno del centro de la cuenca (Macellari, 1995).

Los únicos sedimentos marinos del Eoceno Superior que presenta esta cuenca pertenecen a la Formación Cerro Misión, por lo cual es posible que la invasión marina de esta cuenca comenzara en el Falcón oriental y avanzó hasta el límite occidental de la cuenca (González de Juana *et al.*, 1980).

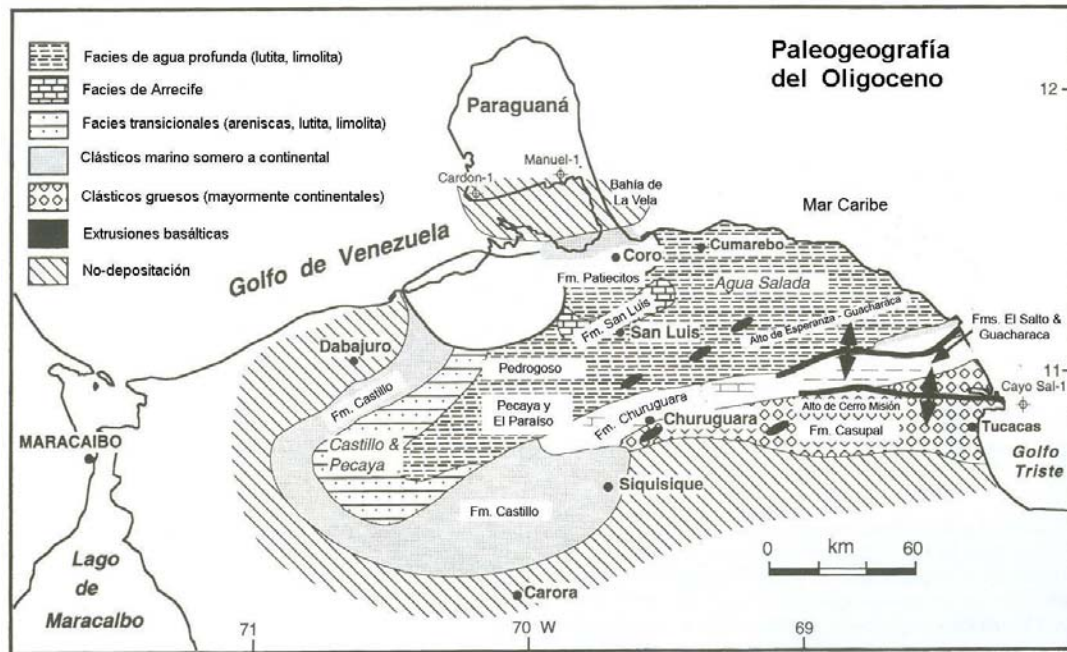


Figura 3.2 Paleogeografía del Oligoceno. Tomado y modificado de Macellari (1995).

La sedimentación de origen marino comenzó probablemente en el Oligoceno Temprano, alcanzando su mayor desarrollo durante la parte media del Oligoceno extendiéndose hasta el Mioceno Temprano. Durante este último las zonas meridionales y centrales de la cuenca se levantaron como áreas positivas, siendo capaces de aportar sedimentos a los ambientes marinos de Falcón centro-norte y Falcón nor-oriental.

Durante este período, Falcón nor-occidental no muestra sedimentación marina, mientras que el centro de la cuenca se consideró una zona subsidente, donde se desarrollaron ambientes marinos profundos, sin embargo en los bordes se observa una sedimentación marginal con mayor influencia terrígena (González de Juana *et al.*, 1980).

Los estratos que componen a la unidad del Oligoceno y Mioceno Inferior se encuentran representados por facies de agua relativamente profunda que constituyen las formaciones El Paraíso, Pecaya y Pedregoso en Falcón oeste-central. En el sureste

de Falcón la secuencia litológica es similar, aunque el nombre de Formación Guacharaca es usado para describir los equivalentes de las Formaciones El Paraíso y Pecaya, mientras que el nombre de la arenisca El Salto es aplicado a los equivalentes de la Formación Pedregoso (Macellari, 1995).

La sucesión litológica del centro de la cuenca, independiente de los nombres usados, no cambia mayormente y representa el común denominador del complejo de facies del Oligoceno-Mioceno. Hacia los márgenes de la cuenca la sección pasa gradualmente a un número de facies de aguas someras. Las facies marginales incluyen a las formaciones San Luis, Patiecitos y Guarabal, en la parte central del flanco norte, La Formación Castillo al extremo oeste de la cuenca, la Formación Churuguara en el flanco sur y la Formación Casupal en el borde sureste de la cuenca (Macellari, 1995).

Wheeler (1963), basado en su propio mapa de isópacos para las formaciones de esta edad, indica la presencia de dos subcuencas, la de Falcón occidental y la del Hueque. Estas subcuencas se encuentran separadas por un estrechamiento del canal central a causa de dos desarrollos arrecifales ocurridos durante este período, al norte la sierra de San Luis y al sur la región de Churuguara. La razón de este estrechamiento se debe a la presencia de un alto con dirección sur-sureste o nor-noroeste denominado Alto de Paraguaná (González de Juana *et al.*, 1980).

Zambrano *et al.* en 1971, mencionan que el Alto de Coro durante el Oligoceno-Mioceno constituyó la prolongación hacia el sur del área positiva de Paraguaná (González de Juana *et al.*, 1980).

#### *Centro de la Cuenca*

Como la mayor parte de Venezuela, Falcón también fue sometida a un régimen de erosión durante el Eoceno Tardío, y solo se inicia la sedimentación con un nuevo

ciclo transgresivo. La sedimentación en esta zona comenzó cuando la invasión marina alcanzó la subcuenca de Falcón occidental, comenzando la depositación oligocénica con la Formación El Paraíso, discordante sobre rocas del Eoceno Medio y arenosa de facies costero deltaicas (Macellari, 1995).

La localidad tipo de la Formación Paraíso se encuentra en la población del Paraíso, sobre el camino real de Pecaya a Churuguara, quebrada o río Paraíso, tributaria al río Mitare, distrito Bolívar, estado Falcón (Hodson, 1926, citado por Macellari, 1995).

Wheeler (1960, 1963), subdividió la formación en dos miembros informales, de los cuales el inferior es de carácter local, aflorando solamente en la quebrada La Danta, al sur de la población de Taparoy, distrito Federación del estado Falcón. La litología incluye lutitas oscuras con capas delgadas y nódulos de ferrolita que meteorizan a gris-marrón en una matriz calcárea blanca y blanda; areniscas ferruginosas calcáreas bien cementadas; algunos conglomerados lenticulares con granos de ftanita (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Díaz de Gamero (1977), indica que las areniscas son de tipo lítico, hasta con un 30% de ftanita, de grano medio a fino y suelen ser delgadas, generalmente bioturbadas, pero ocasionalmente forman paquetes de varios metros de espesor, en los que las capas aumentan de espesor hacia arriba, siendo la arenisca superior la más gruesa con estratificación cruzada y numerosas madrigueras verticales y subverticales rellenas de material arcilloso rojizo.

La parte superior de esta unidad se denota por los extensos afloramientos que se encuentran en las colinas que componen a las llanuras de Falcón central (Wheeler, 1960, 1963), cuya litología característica es la intercalación de lutitas no calcáreas gris violáceas oscuras, con areniscas cuarzosas muy endurecidas, de colores diversos y ocasionales carbones. Díaz de Gamero (1977), describe la variación superior de la Formación El Paraíso en tres grandes áreas, las cuales de este a oeste son:

1.- Al este de la localidad tipo, las lutitas dominan sobre las areniscas, y éstas van haciéndose cada vez menos importantes al este hasta desaparecer; los carbones no se encuentran al este de la carretera Coro-Churuguara. La litología en esta zona es muy monótona, consistiendo de lutitas fisiles gris, a veces violáceas, con nódulos y capas de arcilla ferrolítica, intercaladas con capas delgadas de areniscas cuarzosas, extremadamente duras. Generalmente muestran laminación paralela, ocasionalmente estratificación cruzada a pequeña escala y rizaduras en los topes de las capas. Los estratos de las areniscas forman paquetes de hasta 5 metros de espesor en su parte superior. Las capas más gruesas son masivas, y contienen algunas madrigueras, mientras que las más delgadas están intensamente bioturbadas.

2.- Entre los ríos Paraíso y Pedregal (sección tipo), las lutitas son fisiles, intercaladas con numerosas areniscas cuarzosas, aparentemente de grano medio, con rizaduras en el tope de las capas. Las capas delgadas de carbón y las lutitas carbonosas son muy frecuentes. El espesor máximo en esta región es de unos 1000 metros, expuestos en el río Paraíso y sus afluentes. La sección expuesta en la fila anticlinal más meridional es más lutítica que la que aflora más al norte, donde está representada en la sección tipo, y cuya deformación estructural es aquí máxima.

3.- Entre los ríos Pedregal y Mojino, la litología es similar a la del área tipo, pero las areniscas de grano medio a grueso, constituyen más del 50% de la formación, y los paquetes llegan a alcanzar hasta los 20 metros de espesor, aunque las capas individuales rara vez sobrepasan los 2 metros de espesor. Petrográficamente, las areniscas del miembro superior son arenitas de cuarzo (ortocuarzitas), con los granos de cuarzo cementados por sílice en continuidad óptica, mostrando una textura de mosaico, en la que se hace difícil discriminar los granos originales. Esta característica se mantiene en toda su extensión lateral. La intensa diagénesis observada en las areniscas, solo parece posible como resultado de un profundo enterramiento regional, no inferior a los 5000 metros.

La parte inferior posee un espesor de 205 metros aproximadamente (Wheeler, 1963 y Díaz de Gamero, 1977). Los valores publicados por Wheeler (1960, 1963), provienen de secciones incompletas, y oscilan alrededor de los 500 metros de espesor, en donde incluye a la sección tipo con un espesor de 468 metros. Este mismo autor cita estimados de hasta 1000 metros en Falcón occidental, en la parte sur de Buchivacoa. Díaz de Gamero (1977) cita a Jaeckeli y Erdmann (1952), que estiman que la sección superior de la Formación El Paraíso es de unos 1000 metros, la cual es una cifra que concuerda con mediciones hechas por la autora (Díaz de Gamero, 1977).

La Formación Paraíso aflora en una larga faja anticlinal, desde el río Mojino en el oeste, hasta los ríos Remedios y Hueque al oeste. En el extremo occidental desaparece bajo las lutitas de la Formación Pecaya, suprayacente, mientras que al este adelgaza hasta su práctica terminación antes de ser cubierta por los aluviones del río Hueque y sus afluentes. Esta unidad aflora extensamente en la región central de la cuenca de Falcón, en los núcleos de estructuras anticlinales alargadas que forman colinas y filas, cuya altura esta relacionada directamente con la proporción de areniscas respecto a las lutitas. Así es que las alturas van aumentando en altura de este a oeste, hasta alcanzar unos 1000 metros entre los ríos Pedregal y Mojino (Díaz de Gamero, 1977).

Wheeler (1960) postuló una discordancia o lapso sin sedimentación entre las formaciones Jarillal y El Paraíso, pero en 1963 este mismo autor rectifica su teoría. Hunter (1974), examina nuevamente esta hipótesis, y aunque en campo se observan concordantes estas dos formaciones, la edad que se interpreta para cada una de ellas las separa por un lapso muy grande (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La Formación El Paraíso en su contacto superior se encuentra de manera concordante con la Formación Pecaya, y es generalmente transicional (Wheeler, 1960, 1963; Díaz de Gamero, 1977). Hacia el anticlinal de Taparoy, al sur del estado Falcón, el miembro inferior de la Formación El Paraíso, descansa concordante debajo de la

Formación Churuguara, y es posible que esta relación se mantenga en la faja más meridional de los afloramientos de esta Formación (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Wheeler (1960), asigna la unidad al Oligoceno Tardío, y postuló un largo *hiatus* entre ella y el Eoceno infrayacente. Posteriormente en 1963, este mismo autor modifica su planteamiento, y considera a la Formación con edad Oligoceno Temprano a medio. Díaz de Gamero (1977), por medio del estudio hecho a foraminíferos planctónicos, asigna la edad de Oligoceno temprano a medio. La parte inferior, prácticamente estéril, se le asigna a la zona de la *Globigerina ampliapertura* hasta la zona de la *Cassigerinella chipolensis-Hastigerina micra*. La parte superior se le asigna a la zona de la *Globorotalia opima opima* (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

La Formación El Paraíso se correlaciona al sur en su parte inferior con la Formación Churuguara (Wheeler, 1960, 1963; Díaz de Gamero, 1977). Las relaciones hacia el oeste y norte son desconocidas, mientras que al este se correlaciona con la parte inferior del Grupo Agua Salada, el cual fue redefinido por Díaz de Gamero (1985).

La parte inferior de la Formación El Paraíso indica un fuerte levantamiento al sur, posiblemente de carácter local, ya que se pasa rápidamente de condiciones marinas someras a litorales, e incluso fluviales (González de Juana *et al.*, 1980).

La mayor parte de esta formación es de tipo regresivo, en 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 deltaica. Los carbones marcan el límite oriental de dicha llanura a unos kilómetros al este del actual río Paraíso. El oleaje y las corrientes litorales, retrabajaron los clásticos gruesos, y los extendieron por grandes distancias a lo largo de la costa. Al este del río predominaron las condiciones marinas y las lenguas clásticas separadas por lutitas

marinas, las cuales marcan las condiciones de línea de costa durante la sedimentación de la Formación (Macellari, 1995).

Díaz de Gamero (1977) determina en forma muy aproximada las tasas de sedimentación y de subsidencia para esta formación en la región central de la cuenca de 500 m/M.a. y 500 m/M.a. respectivamente.

Un espesor de la secuencia de lutitas limosas oscuras en el centro de la cuenca de Falcón es compuesto por la Formación Pecaya (Díaz de Gamero, 1977). La localidad tipo originalmente designada por Senn (1935) se encuentra a unos 10 km al oeste de la población de Pecaya, en el río Mitare, distrito Bolívar, estado Falcón. Esta sección solo expone a la parte superior de la formación (Macellari, 1995).

Esta unidad consiste de lutitas gris oscuro, generalmente fisiles y limolitas, localmente calcáreas, con ocasionales interestratificaciones de areniscas y calizas bioclásticas en capas muy delgadas. Este tipo de intercalaciones se ven generalmente en la región norte, cerca de la sierra de San Luis, donde se ven concreciones irregulares de material calcáreo de hasta más de 2 metros de diámetro (Díaz de Gamero, 1977). Hacia los bordes de la cuenca se observan capas de areniscas parduscas, limolitas nodulares gris oscuro, areniscas glauconíticas, y algunas intercalaciones de calizas. También se encuentran nódulos de arcillas ferrolíticos de unos 10 cm. de diámetro alineados con la estratificación (Wheeler, 1960; 1963).

Esta formación contiene un miembro arenoso, el cual se define como el Miembro San Juan de la Vega, que aflora al norte de la cuenca, cerca del río Mitare (Díaz de Gamero, 1977).

Hacia la base de este conjunto rocoso, en la parte central de la cuenca, las lutitas son calcáreas, meteorizando a gris claro casi blanco, y los fragmentos están cubiertos por pequeños fragmentos de calcita (Díaz de Gamero, 1977). En esta zona también se



encuentran algunos lentes de caliza, de los cuales la caliza de la Bocaina es la más competente.

A lo largo de una faja relativamente estrecha, que va desde La Cruz de Taratara y termina al este de Pueblo Nuevo, se observan aflorando una serie de cuerpos ígneos de tipo basáltico que intrusionan a la Formación Pecaya (Coronel, 1970; Muessig, 1978, citados por Escorihuela y Rondón, 2002).

La Formación Pecaya ocupa todo el centro de la cuenca, entre las serranías de San Luis 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). Según estas dimensiones, (Wheeler, 1963) menciona un espesor de 600 metros cerca de Pedregal, en la sección tipo, lo cual es la parte superior de la formación, por encima del Miembro San Juan de la Vega. Este mismo autor indica un espesor de 1300 metros al oeste del distrito Buchivacoa (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Díaz de Gamero (1977), sugiere un espesor de 2500 metros, llegando hasta 4000 metros de sección original al sur y sureste de Tupure. Esta misma autora menciona 1000 metros para la parte superior, entre el Miembro San Juan de la Vega y la Formación San Luis, al este de Pecaya, y 1000 metros para la parte inferior entre la Formación El Paraíso y el Miembro San Juan de la Vega.

Debido al contenido litológico de la Formación Pecaya, se puede ver como respuesta topográfica en el centro de la cuenca que se forman zonas de bajo relieve y poca expresión topográfica entre las filas soportadas por las areniscas de la Formación El Paraíso (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Esta unidad se encuentra en contacto inferior con la Formación El Paraíso concordante y en forma transicional. Su contacto superior es variable a lo largo de su

extensión lateral ya que en su parte norte, específicamente al este de la Formación Pecaya se interdigita con la Formación San Luis; desde Pecaya hasta Pedregal, el contacto superior es concordante y transicional con la Formación Pedregoso; al oeste de Pedregal es concordante con la Formación Castillo, y hacia el sur se intercala con la Formación Churuguara (Díaz de Gamero, 1977).

La edad está definida en base a foraminíferos planctónicos y va desde la Zona de *Globorotalia opima opima*, del Oligoceno medio a la Zona de *Catapsydrax dissimilis*, del Mioceno Temprano. Muessig (1978) determinó una edad K-Ar de  $22,9 \pm 0,9$  m.a en los cuerpos ígneos intrusivos dentro de la Formación Pecaya (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

En cuanto a la correlación, Wheeler (1960, 1963) consideró todo el Grupo Mitare, que incluye el Miembro San Juan de la Vega, más la parte superior de la Formación Pecaya y la Formación Pedregoso como equivalentes a la Formación San Luis. Díaz de Gamero, (1977), considera que solo la parte de la Formación Pecaya que aflora por encima del Miembro San Juan de la Vega se correlaciona con la Formación San Luis.

La Formación Pedregoso parece ser una facies local dentro de la Formación Pecaya, y es por lo tanto equivalente a la parte superior de esta. En la parte media y superior de la Formación Pecaya, se correlacionan con la Formación Castillo, al oeste de la cuenca (Díaz de Gamero, 1977). En la región meridional donde aflora esta unidad, se correlaciona con la parte media y superior de la Formación Churuguara (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Díaz de Gamero (1985), correlaciona la Formación Pecaya con la mayor parte de la mitad inferior de la Formación Agua Salada de Falcón nororiental y con la mayor parte de la Formación Guacharaca y el Miembro El Salto de la Formación San Lorenzo de Renz (1948), en Falcón centro-oriental.

En cuanto a los paleoambientes, la gran unidad lutítica fue sedimentada en condiciones marinas profundas según las evidencias encontradas. Los intervalos basales de las lutitas que suprayacen a la Formación El Paraíso (e igualmente, al Miembro San Juan de la Vega), contiene una microfauna indicativa de profundidades moderadas, alrededor de 100 metros. Las asociaciones litológicas indican para la parte inferior de la Formación Pecaya, una rápida subsidencia hasta la zona batial intermedia, que no llega a los 1000 metros de profundidad. El intervalo de faunas arenáceas marca un período de fuerte subsidencia, que en un corto tiempo llevó a la cuenca de profundidades de 1000 a 1500 metros (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1999).

Díaz de Gamero (1977), calculó las tasas de sedimentación y de subsidencia en el centro de la cuenca durante la sedimentación de la unidad de la siguiente manera:

- 1.- Formación Pecaya inferior: sedimentación de 270 m/M.a y la subsidencia en 500 m/M.a.
- 2.- Formación Pecaya, intervalo de faunas arenáceas: subsidencia en 700 m/M.a.
- 3.- Formación Pecaya superior: sedimentación de 400 m/M.a.

Díaz de Gamero (1996) citada por el Léxico Estratigráfico de Venezuela (1999), reinterpretó el conjunto arenáceo como arcillas de prodelta en aguas profundas, relacionadas con la desembocadura del río proto-Orinoco en el margen occidental de la cuenca, representado posiblemente por la Formación Castillo.

Durante el Mioceno Temprano por una subsidencia regional se produjo un solapamiento y un sobrecorrimiento de los márgenes previos de la cuenca. En el centro de la cuenca la sedimentación comenzó con las lutitas de la Formación Agua

Clara, una secuencia de lutitas ferruginosas negras con intercalaciones de limolitas y areniscas calcáreas que son localmente glauconíticas (González de Juana *et al.*, 1980).

Estas lutitas son generalmente muy fosilíferas y localmente tienen olor a petróleo. La parte inferior de la Formación Agua Clara se compone de calizas muy ricas en fósiles, siendo esta unidad compuesta por corales, briozoarios, gasterópodos y foraminíferos. El espesor de esta formación varía de 1320 a 1600 metros (Wheeler, 1963).

Debido a que esta unidad se ha preservado a lo largo de los márgenes de la cuenca, los moluscos y foraminíferos indican ambientes de aguas someras (Díaz de Gamero, 1977). Según esta misma autora, la edad de esta formación es Mioceno Temprano, debido a la presencia de la zona de *Catapsydrax dissimilis* a zonas de *Praeorbulina glomerosa*.

A lo largo de los márgenes sureste y suroeste de la Sierra de San Luis, se inicia el ciclo de depositación con la Formación Pedregoso. Esta es una lutita intercalada con areniscas, y calizas bioclásticas que poseen una interpretación de depósitos turbidíticos proximales (Díaz de Gamero, 1977). Esta unidad posee rangos de espesores que varían de los 120 metros en el este a 940 metros en el oeste (Wheeler, 1963). Esta formación es rica en fauna que indica el Mioceno Temprano como lo es la *Globigerinoides primordius* y las zonas bajas de la *Catapsydrax dissimilis* (González de Juana *et al.*, 1980). Esta unidad fue probablemente depositada en un ambiente de aguas profundas a someras hacia el tope (Díaz de Gamero, 1977).

#### *Oeste de Falcón*

En el oeste de la cuenca de Falcón, la Formación Pedregoso es la más arenosa y de mayor espesor, y es correlacionada con la Formación Castillo (Wheeler, 1963). La Formación Castillo es concordante en la cuenca con el área de facies de las lutitas de Pecaya. Más hacia el oeste, ésta tiene un contacto angular con estratos del Eoceno. La

Formación El Castillo es dominado por areniscas y conglomerados, con pequeñas medidas de lutitas y corales de costura (Wheeler, 1963). La unidad fue depositada bajo condiciones marinas hacia el centro de la cuenca, con contenido salobre y siempre con facies continentales influenciadas hacia el oeste del margen de la cuenca (Macellari, 1995).

El principal depocentro de la Formación Castillo (sobre los 1480 metros), forma un pliegue paralelo a la vieja línea de costa hacia el oeste. Se estima que esta unidad se depositó luego del Oligoceno-Mioceno Temprano en base a las relaciones estratigráficas (González de Juana *et al.*, 1980).

#### *Alto de Coro*

El complejo arrecifal de la Sierra de San Luis se desarrolló a lo largo del margen sur del Alto de Coro durante el Oligoceno-Mioceno (Ver figuras 3.2 y 3.3). Aunque el núcleo del arrecife se incluye en la Formación San Luis, las facies de antearrecife y de mar abierto de la Formación Pedregoso fueron depositadas al sur. En contraste, las facies periarrecifales se encuentran interdigitadas con lutitas deltaicas y costeras y facies de areniscas de la Formación Patiecitos, y con facies de areniscas y conglomerados de la Formación Guarabal a lo largo del margen norte (González de Juana *et al.*, 1980).

La Formación San Luis consiste en calizas arrecifales masivas, que contienen largos foraminíferos, algas, y localmente largas presencia de corales y bivalvos (Wheeler, 1963). El máximo desarrollo del arrecife es restringido a la parte este de la Serranía de San Luis, donde las calizas arrecifales son de más de 100 metros de espesor (Díaz de Gamero, 1977). Los máximos espesores de la Formación San Luis se estiman en 800 metros (Wheeler, 1960), y se infiere una edad post Oligoceno (*Globorotalia opima opima*) a Mioceno Temprano (*Catapsydrax stainforthi*; González de Juana *et al.*, 1980).

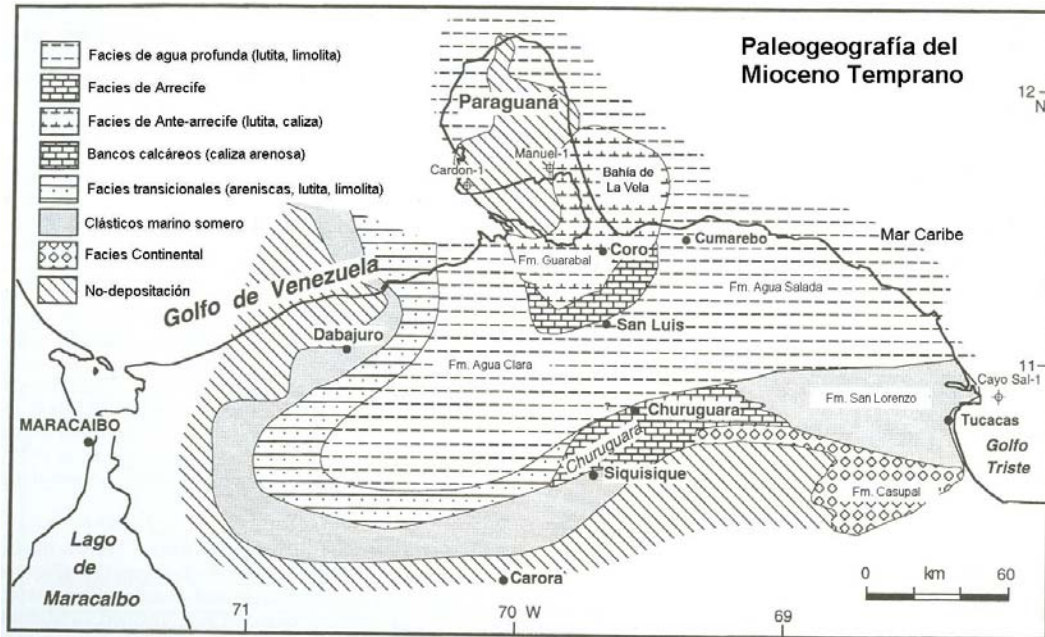


Figura 3.3 Paleogeografía del Mioceno Temprano. Tomado y modificado de Macellari (1995).

### *Falcón sur-central*

La cuenca de Falcón sur-central se desarrolló sobre facies carbonáticas a lo largo de la extensión sur del Alto de Coro (Ver Figuras 3.3). La secuencia completa del Oligoceno- Mioceno Inferior consiste de una serie de lomas formadas por calizas, areniscas y lutitas de 125 metros de espesor, las cuales juntas forman a la Formación Churuguara (Wheeler, 1963, citado por Macellari, 1995).

El contacto inferior de la Formación Churuguara es concordante con la Formación Jarillal y el contacto superior también es concordante con la Formación Agua Clara.

### *Este de Falcón*

Macellari (1995) explica que en esta zona de la cuenca, la depositación durante este ciclo se compone de una gran variedad de facies. Al norte del Alto de la Esperanza y

Churuguara se encuentran lutitas de aguas profundas (Grupo Agua Salada), acumulada en lo que es llamado la subcuenca de Agua Salada (Díaz de Gamero, 1985) o el depocentro Hueque (Wheeler, 1963). Al sur de este alto, los estratos son considerablemente de granos gruesos y son incluidos en las formaciones Guacharaca y Casupal (Renz, 1948; Blow, 1959; Díaz de Gamero, 1985).

#### Mioceno Medio-Tardío:

Al final del Mioceno Temprano, el modelo de sedimentación en la cuenca de Falcón cambió significativamente como resultado de la pendiente relativa del nivel del mar o levantamiento rápido asociados con las tempranas etapas de deformación. Después de este evento, se renovó la subsidencia iniciando un nuevo ciclo de sedimentación, el cual es el primero que cubrió por entero a la cuenca, incluyendo relieves topográficos como la Plataforma de Dabajuro y la Península de Paraguaná (Macellari, 1995).

Nuevamente las áreas levantadas proveen considerable material sedimentario. Este ciclo sedimentario ocurre en un ambiente somero o restringido, excepto en el noreste de la cuenca Agua Salada y al norte de la Península de Paraguaná donde las facies de aguas profundas persistieron (V.F.Hunter, 1986, comunicación personal con Audemard, 1997).

#### *Área central de la cuenca*

En el centro de la cuenca, comienza con la depositación de la Formación Cerro Pelado, equivalente a las lutitas de Guarabal. Esta formación consiste principalmente de lutitas arenosas e interdigitaciones de areniscas de grano fino (Liddle, 1946). Las areniscas usualmente presentan estratificación cruzada y laminación cruzada ondulada y capas delgadas de lignito sobre 1 metro de espesor (González de Juana *et al.*, 1980). La Formación Cerro Pelado fue depositada discordantemente en el tope de las lutitas de Agua Clara, y estas están sobre los 1000 metros de espesor y son

reemplazadas por las lutitas del Grupo Agua Salada. Díaz de Gamero (1977) asignó a Cerro Pelado a la zona de *Globorotalia foshi peripheroronda* (Mioceno Temprano a Medio) (Macellari, 1995).

Las capas de la Formación Socorro se aprecian afuera en las colinas del oeste de Falcón y en la zona de Cumarebo. En la sección tipo, cerca de la población del Socorro, la Formación Socorro es una lutita basal con un intervalo de areniscas en el tope. La parte superior son areniscas de grano fino, reservorios de hidrocarburos en el campo de Cumarebo (González de Juana *et al.*, 1980).

La Formación Socorro tiene un espesor de 1570 pero adelgaza a 660 metros al sur de Coro (González de Juana *et al.*, 1980). La microfauna de la parte baja de la sucesión es asignada a la zona de *Globorotalia foshi foshi* (Mioceno Temprano a Medio) (Díaz de Gamero, 1977). La Formación Socorro fue depositada en un ambiente costero al oeste, el cual se hizo más marino gradualmente al este (González de Juana *et al.*, 1980). La Formación Socorro posee una sucesión gradual ascendente hacia la Formación Urumaco en el área del Surco de Urumaco y adelante al este, hacia el Formación Caujarao (Macellari, 1995).

La Formación Caujarao incluye 1220 metros de lutitas interbandeada con margas, calizas y areniscas de grano fino que guardan hidrocarburos en el campo de Cumarebo (Payne, 1951). Cambios rápidos de facies son reflejados en una diversa nomenclatura estratigráfica. La Formación Caujarao fue depositada en una plataforma marina de ambiente cálido, marino tropical (Petzall, 1959). La fauna es rica en indicadores de rango de edad que va desde la zona de *Globorotalia menardii* (post Mioceno medio) a la zona de *Globorotalia acostaensis* (post Mioceno) (Díaz de Gamero, 1977).

Hacia el oeste, en el área del Surco de Urumaco, la Formación Caujarao es remplazada por la Formación Urumaco (ver Figura 3.4). Estas son facies más



proximales que la Formación Caujarao e incluyen lutitas marinas y no marinas, areniscas y carbones marcadores. El espesor de la Formación Urumaco esta sobre los 1675 metros (Macellari, 1995).

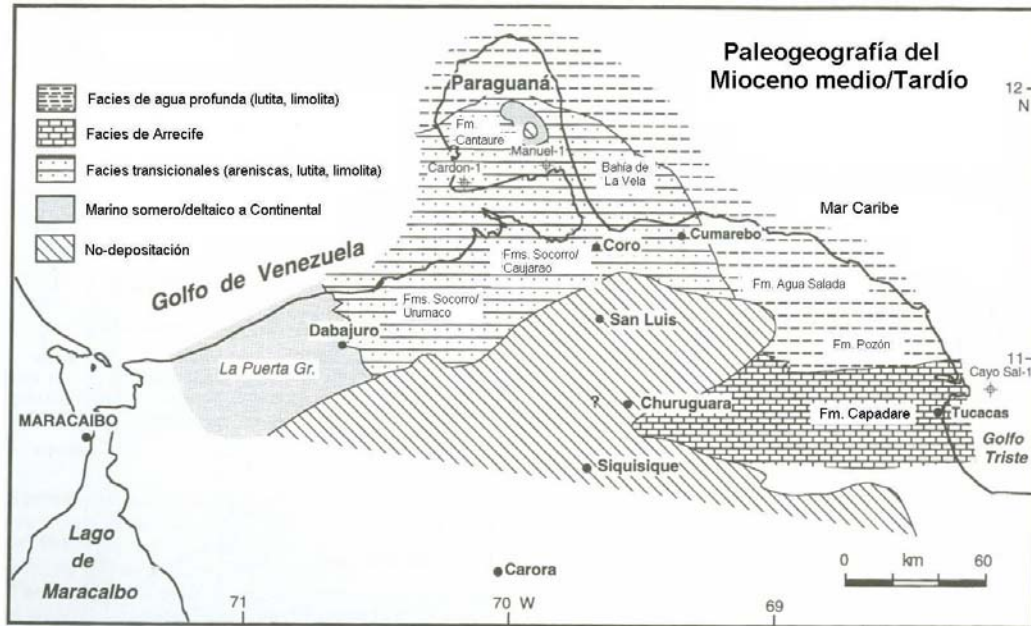


Figura 3.4. Paleogeografía del Mioceno medio/Tardío. Tomado y modificado de Macellari (1995).

La Formación La Vela es concordante con la Formación Caujarao en el área de Coro. Esta incluye 590 metros de areniscas calcáreas interbandeadas con lutitas, reflejando ambientes depositacionales de playa y estuarinos (González de Juana *et al.*, 1980). La edad de la Formación La Vela varía entre las zonas de *Neogloboquadrina dutertrei* y *Globorotalia margaritae* (después del Mioceno a Plioceno Temprano) (Díaz de Gamero, 1968). La Formación La Vela tuvo al este facies de mar abierto en la Formación El Veral y al oeste facies más continentales en la Formación Codore (González de Juana *et al.*, 1980).

### *Oeste de Falcón*

Los sedimentos depositados en el oeste de la cuenca de Falcón durante este ciclo incluyen al Grupo La Puerta. Esta unidad incluye arcillas, areniscas y lignito superpuesto por areniscas masivas con estratificación cruzada, y está cubierto por lutitas de varios colores (Halse, 1937). La depositación se cree que ocurrió en un área de piedemonte a costera, con una proveniencia localizada al sur (González de Juana *et al.*, 1980). En la Plataforma de Dabajuro, los estratos del Grupo La Puerta descansan directamente en rocas del Eoceno. Los máximos espesores de esta unidad son de 2140 metros, y fueron encontrados en el pozo QMC-1X (Macellari, 1995).

### *Noreste de Falcón*

Los sedimentos depositados en este ciclo son incluidos en la parte superior del Grupo Agua Salada y la Formación Pozón (sur) (ver figura 3.4). En el depocentro de Agua Salada, la base de este ciclo está representada por la Formación El Salto, con un espesor estimado de 800 a 900 metros. Según Díaz de Gamero (1985), esta unidad es de cuatro facies: (1) bloques olistostromo de 1 a 5 metros de diámetro de areniscas, limolitas y carbón, embebidos en lutita; (2) areniscas de grano fino en capa de 20 a 50 centímetros de espesor; (3) limolitas masivas con restos de plantas en la base con crecimiento del grano en forma ascendente dentro de las arenisca; y (4) pequeños espesores de capa de areniscas (Díaz de Gamero, 1985, citado por Macellari, 1995).

Conforme con Díaz de Gamero (1985), la Formación El Salto es un depósito deltaico relacionado al aumento de procesos de fallas y de corrientes de turbidez. Estos sedimentos deltaicos confinados en la secuencia de agua profunda de Agua Salada son atribuidos a un *lowstand* del nivel del mar. La edad de esta formación se atribuye al rango de edad que marcó a las zonas de la *Praeorbulina glomerosa* a la *Globorotalia foshi peripheroronda* (Díaz de Gamero, 1985, citado por Macellari, 1995).

Al sur del depocentro de Agua Salada, la parte superior de la secuencia consta de 150 a 300 metros de carbonatos de aguas someras de la Formación Capadare (ver figura 3.4). La sedimentación de Capadare comenzó en el Mioceno Medio en su parte inicial (*Globorotalia foshi foshi*) y continua después del Mioceno Medio (Díaz de Gamero, 1985, citado por Macellari, 1995).

#### *Falcón sur-central*

Las rocas de este ciclo en esta parte de la cuenca son representadas por la Formación Pozón, que se divide en los miembros Policarpio, Husito y Huso, en orden ascendente respectivamente (González de Juana *et al.*, 1980). Esta es un sucesión de lutitas con areniscas glauconíticas y margas en la base (Renz, 1948). La Formación Pozón esta sobre los 1040 metros de espesor. Bioestratigraficamente estas rocas son asignadas al comienzo del Mioceno Medio hasta en Mioceno Tardío (Díaz de Gamero, 1985).

#### *Sureste de Casupal*

En el sureste del depocentro de Casupal, las areniscas y conglomerados de Casupal se encuentran sucedidas por 1300 metros de lutitas, arcillas, y calizas de la Formación Agua Linda (Ministerio de Minas, 1970) (ver figura 3.4). La Formación Agua Linda es concordante con la Formación Casupal, y se encuentra discordante con las calizas de la Formación Capadare (González de Juana *et al.*, 1980, citado por Macellari, 1995).

La Formación Agua Linda es equivalente lateral de la Formación Pozón, ésta se deposita en ambientes de menor profundidad y más cercanos a la costa. Al mismo tiempo es más marino que los clastos carbonosos de la Formación Casupal infrayacente. Ello indica una trasgresión marina ocurrida en el Mioceno medio, desde los ambientes marinos profundos de Agua Salada al sur, sobre la sedimentación marginal de Casupal (González de Juana *et al.*, 1980).

Plioceno:

Una mayor fase de la inversión de la cuenca tuvo lugar durante el Plioceno. Facies clásticas granulares fueron depositados al norte del anticlinorio de Falcón elevado (formaciones Coro y San Gregorio). En el área del noreste de la costa, las rocas sedimentarias están compuestas de arcillas calcáreas, margas fosilíferas, y calizas argiláceas (Formación Punta Gavilán) (González de Juana *et al.*, 1980).

*Costa septentrional de Falcón*

El más occidental de los afloramientos de esta edad se presenta al norte de Urumaco, y es conocido como la Formación San Gregorio, descrita por Stainforth (1962), y este fue subdividido en tres miembros. En los dos miembros inferiores predomina una litología de limolitas, y solamente el superior, Río Seco, abundan los conglomerados. El intervalo central es fosilífero, siendo este el Miembro Coquiza. Se determinó que es de edad Plioceno por correlación con la Formación Tucupido, en la región de Cumarebo. Algunos autores han correlacionado los conglomerados del Miembro Río Seco con la Formación Coro (González de Juana *et al.*, 1980).

Graf (1969), indica que la parte superior de la Formación Coro, es conglomerática con nódulos ferruginosos y ausencia de material calcáreo, representa un cambio hacia climas más húmedos, y coloca el contacto entre Plioceno-Pleistoceno en la Formación Coro (González de Juana *et al.*, 1980).

En la Península de Paraguaná, Hunter y Bartok (1974) han descrito la Formación Paraguaná, cuyo miembro inferior, denominado Miembro Hato, se considera Plioceno Temprano. El ambiente de este miembro se considera que es marino somero. Los autores piensan que la Formación Paraguaná es directamente correlacionable con la Formación Punta Gavilán y Formación Tucupido de la región de Cumarebo, y están en desacuerdo con la correlación hecha con la Formación La

Vela, ya que la microfauna indica una edad Mioceno Tardío. (González de Juana *et al.*, 1980)

En la región de Cumarebo, La Formación Tucupido suprayace en discordancia angular a la Formación El Veral, que Díaz de Gamero (1968) considera extendida hasta el Mioceno Tardío. El ambiente de las capas expuestas es marino somero, y la Formación Tucupido se hace menos marina en sentido ascendente (González de Juana *et al.*, 1980).

La Formación Punta Gavilán aflora desde Tucupido por el oeste, hasta Punta de Zamuro hacia el este, siempre en zonas adyacentes a la costa. En esta región la Formación Punta Gavilán descansa discordante sobre depósitos de ambientes marinos profundos de la Formación Pozón, del Grupo Agua Salada. La litología de calizas y margas limolíticas son indicativas de aguas profundas (Rutsch, 1934), pero los planctónicos estudiados por Díaz de Gamero (1970), indican ambientes sublitorales de profundidades cercanas a los 50 y 60 metros, dentro de la plataforma. Rutsch (1934), considera a la Formación Punta de Gavilán del Plioceno Inferior, pero en 1942 el mismo autor la considera Mioceno Tardío. Según Díaz de Gamero (1970), Punta Gavilán está totalmente comprendida en la parte inferior del Plioceno. (González de Juana *et al.*, 1980)

Los ambientes marinos muestran una considerable reducción de profundidad, desde 1000 metros de la Formación Pozón a 50 o 60 metros de la Formación Punta Gavilán. En general se puede decir que esta zona en el Plioceno representa una regresión con respecto al Mioceno, marcada por las diferencias paleoecológicas de las formaciones el Veral y Tucupido en Cumarebo, y por las formaciones Pozón y Punta Gavilán en Punta de Zamuro (González de Juana *et al.*, 1980)

Por otra parte, los sedimentos se hacen más marinos de oeste a este, desde unidades continentales a pobremente marinas de la Formación San Gregorio, a lutitas con

foraminíferos planctónicos de las formaciones Paraguaná y Punta Gavilán. De igual manera los ambientes se hacen menos profundos al ascender la columna estratigráfica, como lo muestran las formaciones Punta Gavilán y Paraguaná. (González de Juana *et al.*, 1980)

### **Geología estructural regional**

Según González de Juana *et al.* (1980), la geología estructural regional de la cuenca de Falcón se refleja en grandes pliegues que constituyen el anticlinorio de Falcón, y en varias fallas verticales o de buzamiento bajo que son el resultado de un característico sistema de esfuerzos. Este mismo autor indica que las fallas más importantes que afectan a la cuenca son la falla de Oca-Chirinos, El Mayal, Ancón de Iturre y Pozo Negro.

Las fallas de Oca-Chirinos y Pozo Negro separan dos áreas estructurales distintas como lo son: una al norte, donde diferentes fallas se extienden hasta la costa, y otra al sur que se extienden hasta el frente de montaña (Ituarte y Quijada, 1985, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

Hawkins (1983), reconoce tres tendencias estructurales bien definidas, un patrón principal de orientación OSO/ENE, correspondiente al rumbo de las estructuras plegadas, tales como los anticlinales de La Vela, Zambrano-Las Pailas y Cumarebo, entre otras. Una segunda tendencia estructural de dirección noroeste-sureste coincidente con las fallas Lagarto, Sabaneta, Los Medanos y la flexión de Adícora, y por ultimo un patrón de rumbo este-oeste que coincide con la orientación de las fallas Guadalupe y La Vega (Audemard, 1985).

Posteriormente Passalaqua *et al.*, (1984), asocian la transurrencia dextral este-oeste que afecta al área norte de Venezuela a las deformaciones observadas en la cuenca de Falcón, y más concretamente al área este de Coro, así a partir de la orientación de los

ejes de compresión, los cuales siguen la misma orientación de los ejes de compresión, los cuales siguen la misma dirección de los movimientos de las placas Caribe-Sur América (N 20° O-S 20° E), deducen la orientación de las estructuras plegadas y falladas. De esta manera se reconocen cuatro tendencias estructurales bien definidas (Audemard, 1985).

La principal tendencia es perpendicular a la componente de compresión ( $\sigma_1$ ), N70E, la cual coincide con la orientación de los ejes de los pliegues (anticlinales de Las Pailas, La Vela y Cumarebo; y sinclinal de Píritu) y de las fallas inversas, tales como Taima-Taima y Guadalupe. Perpendicular al eje de compresión se origina la componente de tensión ( $\sigma_3$ ), responsable de la presencia de fallas normales con dirección N20W, como por ejemplo: fallas Los Medanos y Occidental de Urumaco. Además, reconocen un sistema conjugado de fallas transcurrentes de menor magnitud, en dirección 30°-35° con respecto a la componente de compresión, que puede ser modelado dentro del modelo de Wilcox *et al.*, (1973), y constituyen las fallas transcurrentes dextrales de Sabaneta, Soledad, Santa Rita, Tocopero y Sabanas Altas, orientadas según una dirección N55°-50°W; y las fallas transcurrentes sinestrales, N10°-15°E, como la falla de Agua Clara (Audemard, 1985).

Simultáneamente Muessig (1984), establece un modelo para las de formaciones estructurales existentes en la región de Falcón y considera que en tiempos del Paleoceno-Eoceno se registró la culminación de la orogénesis compresional en el borde sureste de la cuenca, formándose ésta bajo condiciones de tectónica extensional durante el Oligoceno-Mioceno, a partir de la transurrencia dextral mayor de rumbo este-oeste (Oca y Cuiza); donde estas fallas transcurrentes y las fallas normales de rumbo noroeste que se unen a estas, fueron activa durante el origen de la evolución de las cuencas, y estas fallas son las generadoras de las cuencas de tracción o *pull-apart*. Esta fase extensiva con orientación noreste, es la causante de la subsidencia de la cuenca durante el Oligoceno, donde la máxima extensión ocurrió durante el Mioceno Temprano, acompañada por el adelgazamiento de la corteza y por la inyección de

magmas basálticos (Muessig, 1978). Otra cosa que se puede ver y que llama la atención, además de las zonas de tracción o *pull-apart* de divergencia, son los sistemas de fallas transcurrentes irregulares que desarrollan zonas de convergencia, asociadas a deformaciones de tipo compresional (Muessig, 1984). El mismo autor considera seis tendencias estructurales dentro del anticlinorio de Falcón:

1.- Fallas transcurrentes dextrales de rumbo este-oeste, las cuales son: la falla de Oca, la cual es la mejor conocida de este grupo de fallas dextrales transcurrentes, y que se estima con un rango de desplazamiento entre 15 a 20 Km. post-Eoceno (Feo-Codecido, 1972), 195 Km. post-Cretáceo a pre-Pleistoceno (Vásquez y Dickey, 1972), 65 km post-Mesozoico (Tschanz et al., 1974); otra falla de este conjunto es la falla Cuiza en la Península de la Guajira, la cual es una estructura similar a la anteriormente descrita, y que se estima con un desplazamiento entre 15 a 25 Km. según Álvarez (1967); la última de este conjunto de fallas es la de San Sebastián, que se localiza costas afuera de Venezuela central, y que es citada como la continuación de las fallas de Oca y El Pilar. Vierbuchen (1978), estimó un desplazamiento transcurrente dextral de 140 Km. post-Mioceno.

2.- Fallas normales de dirección este-oeste, como lo son: la falla de Ancón, la cual se encuentra localizada al sur, y en forma paralela a la falla de Oca; y la otra falla de este tipo es la falla paralela a la costa sur en la Península de Paraguaná.

3.- Fallas normales noroeste-norte, donde la Península de Paraguaná se encuentra limitada por este tipo de fallas normales, las cuales son de edad Oligoceno-Mioceno en la cuenca de Falcón y en las áreas costa afuera.

4.- Estructuras plegadas y fallas inversas de rumbo este-noreste, donde los pliegues presentan un rumbo N80E en la parte central y cambian a una dirección N50E hacia el este.



5.- Pequeñas fallas transcurrentes dextrales de dirección oeste-noroeste, las cuales son abundantes en el área de Puerto Cumarebo y áreas cercanas al Surco de Urumaco. En el centro de la cuenca fallas transcurrentes de orientación noroeste-oeste a noroeste, son contrarrestados y terminan como pliegues, fallas inversas y crestas topográficas formadas por resistentes areniscas.

6.- Fallas transcurrentes sinestrales de menor magnitud y conjugadas por el sistema anterior, estas fallas presentan un rumbo este-noreste y son abundantes al sur de Coro y al sureste de la cuenca de Falcón.

Estos seis tipos de tendencias estructurales de deformación son generados según Wilcox *et al.* (1973), para un área con movimientos transcurrentes (*wrenching*) dextrales de gran magnitud en profundidad se refiere. Ahora bien, según Muessig (1984), esta recapitulación de estructuras sintetizada y combinada es lo que demarca la evolución tectónica de la cuenca de Falcón, y de tal manera repercute en su historia geológica (Macellari, 1995, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

Según Boesi y Goddard (1991) citado por Escorihuela y Rondón (2002), existen tres sistemas estructurales desarrollados simultáneamente en la cuenca, cada uno con una máxima intensidad en diferentes tiempos.

El primer sistema estructural consiste de un conjunto de fallas normales de rumbo NE localizadas en la parte norte de la cuenca; este grupo de fallas forman una serie de estructuras *horst* y *graben*, entre las que destacan la Depresión de Urumaco, El Alto de Coro-Paraguaná, La bahía de La Vela (esta estructura es una depresión con un horst local hacia el sur), el Alto de Aruba, y un conjunto de *horst* y *graben* similares hacia el este (ver figura 3.5).

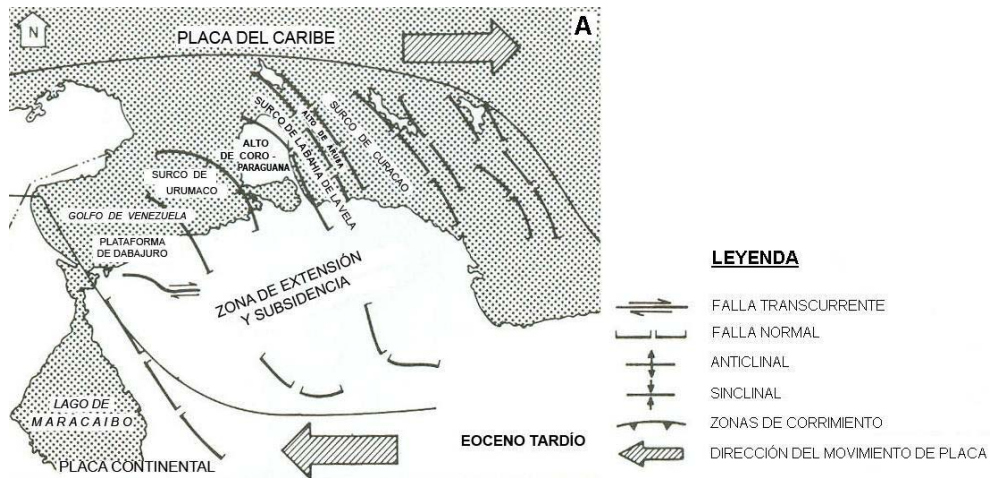


Figura 3.5 Historia tectónica de la cuenca de Falcón durante el Eoceno Tardío. Tomado y modificado de Boesi y Godard (1991).

El segundo sistema estructural consiste de varios fallamientos este-noreste, pliegues paralelos de gran magnitud situados en el centro de la cuenca, conocidos como el anticlinorio de Falcón; estos son el resultado de un componente compresivo noroeste. En áreas de máxima extensión, generando el desarrollo de pliegues paralelos (ver figura 3.6).

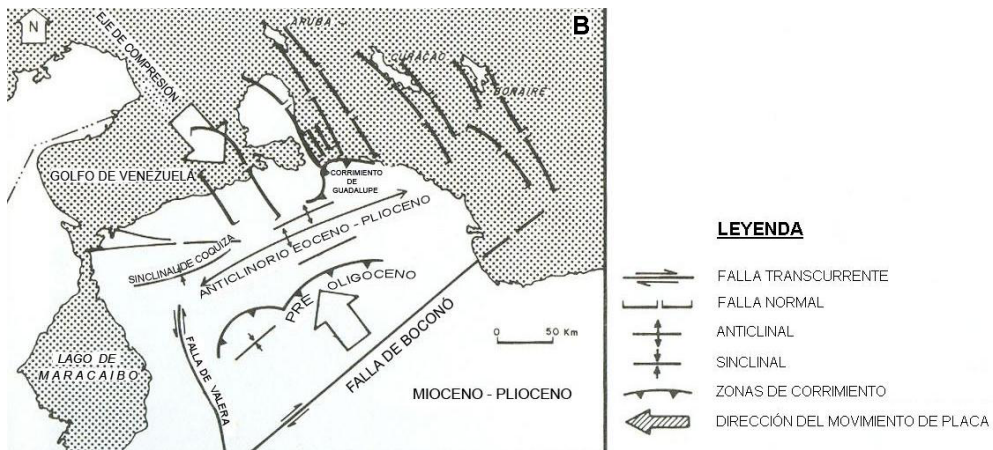


Figura 3.6. Historia tectónica de la cuenca de Falcón durante el Mioceno-Plioceno. Tomado y modificado de Boesi y Godard (1991).

El tercer sistema estructural de fallamiento es dextral lateral, fallas transcurrentes, que comenzó a desarrollarse entre la cuenca en el Eoceno Tardío y continuó hasta

finales del Terciario Tardío hasta el Reciente. Estas fallas resultan del levantamiento y cizallamiento regional de todo el bloque en la cuenca (ver figura 3.7).

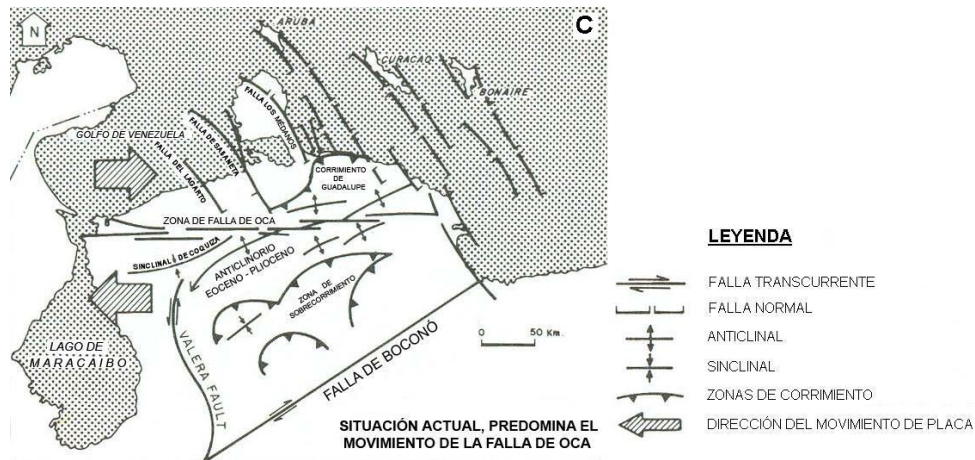


Figura 3.7. Situación actual de la tectónica de la cuenca de Falcón. Tomado y modificado de Boesi y Godard (1991).

Estos mismos estudios, comentados por estos mismos autores indican que en la parte oeste de Falcón a lo largo del sistema de falla de Oca, se han detectado tres sistemas de fallas transcurrentes, formando estructuras en flor que pueden ser observadas a lo largo de la zona de falla y están separadas por sinclinales. Los nombres de estas fallas son Oca, El Mayal y Ancón Iturre (Boesi y Godard, 1991, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

Macellari (1995), indica que la cuenca de Falcón es una depresión con dirección este-oeste, y que se desarrolló al noroeste de Venezuela. En los alrededores del área que compone a la cuenca de Falcón se pueden apreciar tres estilos estructurales según este mismo autor, los cuales son:

1.- Este se encuentra en las partes altas de la Plataforma de Dabajuro y de la Península de Paraguaná, donde estas solo presentan una menor deformación de un espesor delgado del Cenozoico cubriendo basamento metamórfico Mesozoico.

2.- El segundo estilo estructural es representado por un desarrollo notable de fallas noroeste-sureste, que se encuentran entre los altos principales (Golfo de Venezuela, Surco de Urumaco, costas afuera de Aruba, y el este de la bahía de La Vela) (Payne, 1951; Audemard y Demena, 1985; Boesi y Goddard, 1991). Cambios en los espesores estratigráficos a lo largo de estas fallas indican que ellas estuvieron activas durante la sedimentación Oligoceno-Mioceno.

3.- El tercer estilo ocurre a lo largo del anticlinorio de Falcón, el cual toma formas de la parte invertida de la cuenca. El anticlinorio es formado por un conjunto de pliegues elongados este-oeste y de estratos acostados del plano de la costa que es marcado por una zona de vergencia norte que se metió y es asimétrico, y esta representado por pliegues volcados, los cuales se encuentran bien definidos al sur de la población de Coro.

Audemard (1997), señala que la cuenca de Falcón constituye probablemente una de las mejores zonas a nivel regional de todo el país para estudiar y evaluar la actividad tectónica durante los últimos 30 millones de años, debido a la existencia de una sedimentación casi continua y bastante bien datada paleontológicamente. Este mismo autor, indica que actualmente la región de Falcón se encuentra sometida a un estado de esfuerzos caracterizado por un esfuerzo máximo horizontal de dirección NNW-SSE a N-S y un esfuerzo mínimo horizontal orientado ENE-WSW. Dicho tensor de esfuerzos es calculado a partir de datos microtectónicos, medidos exclusivamente en las unidades plio-cuaternarias de Falcón septentrional, es responsable de la cinemática y actividad actual de cinco sistemas de fallas:

1.- Fallas dextrales este-oeste (Oca-Ancon, Adicora)

2.- Fallas dextrales NW-SE (Urumaco, Río Seco, Lagarto, La Soledad)

3.- Fallas normales NNW-SSE (Costa Oeste de Paraguaná, Cabo San Román, Puerto Escondido, Los Medanos)

4.- Fallas sinestrales norte-sur a NNE-SSW (Carrizal, El Hatillo)

5.- Fallas inversas ENE-WSW, las cuales son paralelas al plegamiento regional (Guadalupe, Araurima, Matapalo, Chuchure)

La tasa de desplazamiento de estas fallas es baja (generalmente inferior a 0,4 mm/a), a excepción del sistema Oca-Ancón, que se desplaza a razón de 2mm/a, siendo este el accidente tectónico activo más importante de la región noroccidental de Venezuela por su longitud, la cual es de aproximadamente unos 650 Km. de largo (Audemard, 1997).

Audemard (2000), en base a las siguientes observaciones y evidencias ratifica la cinemática propuesta por él en el año 1997, además de tomar en cuenta el modelo propuesto por Wilcox *et al.* (1973). Las evidencias que toma en cuenta son:

- La forma vertical de los depósitos marinos poco profundos del Plioceno (Formación La Vela) a lo largo del limbo norte del anticlinal de La Vela.
- La parte norte inclinada de los conglomerados de la Formación Coro, de edad Plioceno-Pleistoceno.
- La existencia de dos discordancias límites del Mioceno-Plioceno, y que se ven a veces en el Pleistoceno Inferior.

## **Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón**

El origen de la cuenca de Falcón, enmarcado en un contexto tectónico regional, ha sido objeto de diferentes estudios relacionados con la reconstrucción de las placas mayores y la morfología que muestra actualmente esta cuenca. La cuenca de Falcón-Bonaire tiene un longitud mayor a los 600 km, ya que puede ser seguida hasta el oeste de la Isla de Margarita; aunque actualmente esta cuenca solo aflora con una longitud de aproximadamente 150 km, y va desde la Plataforma de Dabajuro hasta la costa oriental Falconiana (Erllich y Barret, 1990, citado por Escorihuela y Rondón 2002).

### Teoría *Pull-Apart*:

El desarrollo de una complicada cuenca tipo *pull-apart* dentro de una orientación paralela, pero fuera de fallas transcurrentes dextrales, es propuesto para la cuenca de Falcón (Muessig, 1984). Este mismo autor explica el modelo tectónico basado en las siguientes evidencias:

- La estratificación de un complejo Oligoceno-Mioceno y rápida subsidencia histórica de la cuenca.
- Fallas transcurrentes sinsedimentarias este-oeste y fallas normales con dirección noroeste.
- Anomalías de gravedad positiva indicativas de una relativa capa densa de corteza.
- Volcanismo basáltico alcalino e intrusión ígnea en dirección noroeste.

Una cuenca *pull-apart* es una zona de extensión de la corteza y subsidencia que se desarrolla en un sistema de fallas transcurrentes inclinadas, como puede ser una inclinación divergente (Crowell, 1974). La subsidencia ocurre en fallas normales que se conectan con secciones paralelas del sistema de fallas transcurrentes. La subsidencia resultante puede ocurrir a lo largo de las fallas transcurrentes (Muessig, 1984).

El desarrollo de una estructura *pull-apart* en la cuenca de Falcón refleja la evolución tectónica del período Terciario donde un largo bloque de corteza reflejó al bloque Bonaire (Silver *et al.*, 1975). Este bloque estuvo sujeto a cizallamiento dextral, entre la Placa del Caribe y la Placa Suramericana (Muessig, 1984).

Pindell *et al.* (1998), mencionan un modelo de evolución entre el Golfo de México y la Placa Caribe, e indican que desde el Eoceno la Placa del Caribe ha migrado hacia el este 1100 Km., con una velocidad aproximada de 2 cm/año (Escorihuela y Rondón, 2002).

Muessig (1978), indica que la cuenca de Falcón se origino durante el Eoceno Tardío a Oligoceno, en una zona tipo *pull-apart*, causado por movimientos transcurrentes entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana. Define este límite de placas como una falla transformante y la expresa como una serie de fallamientos dextrales a lo largo de una línea que permite conectar la Falla de Oca con la Falla de San Sebastián (Escorihuela y Rondón, 2002).

Estos movimientos transcurrentes a lo largo de las fallas generaron la extensión en dirección noreste, produciéndose así fallas normales, y provocando el adelgazamiento de la corteza y la generación de magmas basálticos alcalinos. Este modelo estructural propuesto por Muessig (1978), le permite decir en su teoría que las islas de Los Monjes y La Orchila, la Península de Paraguaná y la cuenca de Falcón fueron casi yuxtapuestas antes de la extensión oligocénica. Este autor presenta dos modelos, en

los cuales se expresan las opciones que dieron origen a la cuenca (ver figura 3.8). Muessig (1978), adopta la opción *b*, y representa a través de tres esquemas ilustrados el desarrollo de la cuenca de Falcón y el Bloque Bonaire desde el Eoceno al presente. La extensión de la cuenca ocurre en dirección este-oeste (Muessig, 1978, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

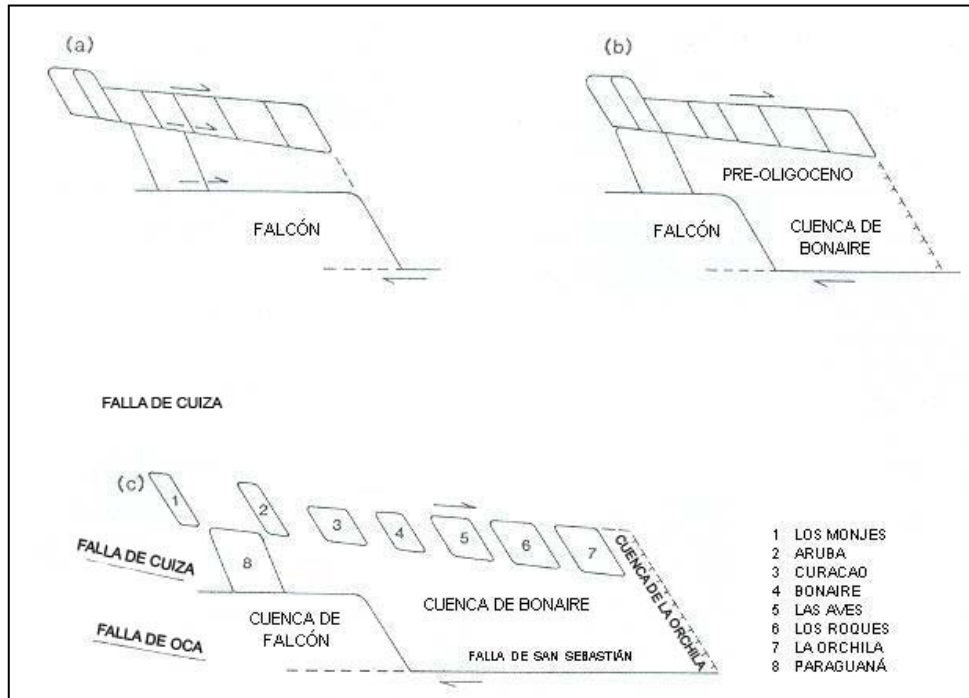


Figura 3.8 Evolución de las cuencas *pull-apart* Falcón y Bonaire. *a* y *b* representan dos configuraciones del área anterior a la extensión Eoceno Tardío. Para llevarlo a la configuración presente *c* la opción *a* requiere una gran cantidad de extensión y desplazamiento transcurrente dextral de Oligoceno a Mioceno. En la opción *b* la cuenca Bonaire pre-Oligoceno tiene un mayor adelgazamiento, corteza oceánica y requiere menos extensión para llevar a la configuración de la opción *c*. Tomado y modificado de Muessig (1978).

Durante el Eoceno Temprano las Antillas Menores formaron una unidad contigua conectadas a la Península de Paraguaná y al área de Falcón (ver figura 3.8 a). En el Eoceno Tardío a Oligoceno por extensión se generó la cuenca, evidenciado por el fallamiento y la inyección de magma (ver figura 3.8 b). Del Mioceno al presente grandes eventos compresivos durante este período, generaron un cambio en la evolución tectónica, donde la cuenca evidencia inversión (ver figura 3.8 c) (Muessig, 1978, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).



Muessig (1984), indica que el sistema *pull-apart* de Falcón, es una extensión que fue dispuesta sobre una ancha zona, resultando en áreas de relativa estabilidad y subsidencia. Paraguaná, Dabajuro, La Guajira y el sur de Siquisique siguieron como altos, suministrando sedimentos al *graben* de las zonas *pull-apart*. La cuenca de Falcón, el surco de Urumaco, la bahía de La Vela y la cuenca de Bonaire representan las mejores zonas de subsidencia.

Cabrera (1985), citada por Escorihuela y Rondón (2002), menciona en su trabajo la historia tectónica sedimentaria del área, y resume los principales aspectos que intervienen en esta de la siguiente manera:

- 1.- Fase extensional (Eoceno Tardío - Oligoceno Tardío): se formó el *graben* tipo ensenada La Vela, donde en esta se notan fallas de crecimiento noreste-suroeste, que favorecen a la sedimentación de grandes espesores para la Formación Pecaya y de sus equivalentes.
- 2.- En el Mioceno Temprano la trasgresión de Agua Clara, produce la máxima actividad de fallas de crecimiento, y resulta la cobertura parcial de los paleo altos.
- 3.- Al final del Mioceno Temprano, se produce la erosión total de las estructuras preexistentes, y en este período cesa la fase extensional.
- 4.- En el Eoceno Medio a Mioceno Tardío, se representa un período de relativa estabilidad, y se rellenó el *graben* con sedimentos provenientes de las rocas que pertenecen a las formaciones Socorro, Caujarao y equivalentes.
- 5.- Se produce la fase compresional Mioceno Tardío-Plioceno Reciente, y como consecuencia de esto se activa la inversión de la cuenca, se forma el anticlinorio de dirección este-oeste, y declive al este; la deformación pliocena tiene como límite actual el corrimiento de Guadalupe en la costa falconiana.

Macellari (1995), coincide con Muessig (1978), en el proceso de generación de la cuenca, ya que este modelo permite explicar los flujos basálticos orientados en el centro de la cuenca falconiana. El autor analiza la estratigrafía depositada durante el Eoceno hasta el reciente en una serie de cuencas *pull-apart* episuturales. Durante el Oligoceno-Mioceno, el eje de subsidencia máxima de esta serie de cuencas estuvo ubicado más hacia el este, en el surco de Urumaco, y al este en la ensenada de La Vela. Al mismo tiempo comenzó a desarrollarse un depocentro con ubicación este-noroeste-oeste suroeste en la cuenca de Falcón, como respuesta flexural a la carga producida por un frente de cabalgamiento que avanzaba desde el sur (Macellari (1995), citado por Escorihuela y Rondón (2002).

Macellari (1995), citado por Escorihuela y Rondón (2002) a través de los siguientes gráficos muestra el modelo de evolución tectónica para la cuenca tipo *pull-apart* de Falcón, en el suroeste del Caribe. En la figura 3.9, se muestra en el Eoceno Tardío, un desplazamiento entre las dos placas, resultando la formación de una extensa zona *pull-apart* en el margen norte de Sudamérica, entre el *ridge* de Curazao y el sistema de fallas San Sebastián-Oca.

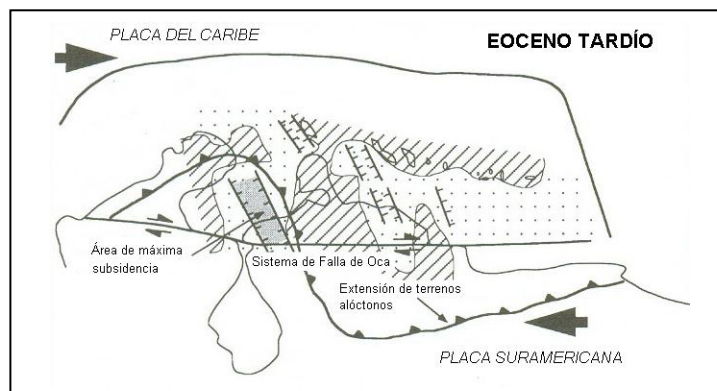


Figura 3.9 Modelo de generación de Cuencas *pull-apart* episuturales (suroeste Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Eoceno Tardío. Tomado y modificado de Macellari (1995).

En la figura 3.10, se observa que durante el Oligoceno y Mioceno comenzó un estrechamiento de la cuenca *pull-apart* debido al empuje de 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 de la falla de Oca y se formó un frente de empuje que avanzó progresivamente al norte formándose una cuenca *foreland* con orientación ENE-WSW.

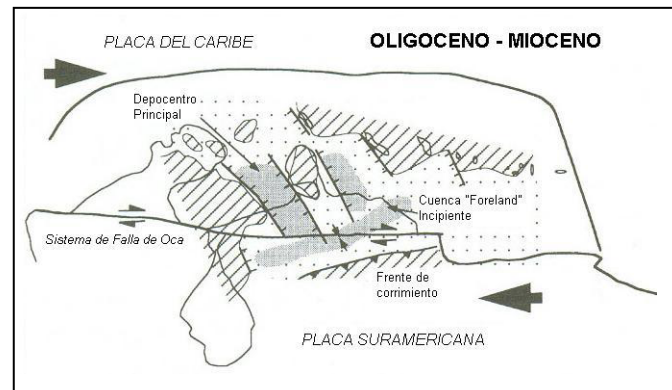


Figura 3.10 Modelo de generación de Cuencas *pull-apart* episuturales (suroeste Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Oligoceno - Mioceno. Tomado y modificado de Macellari (1995).

Así mismo Macellari (1995), indica a través de la figura 3.11 que el movimiento transpresivo a lo largo de la falla del margen de Suramérica (Kellog y Bonini, 1982) durante el Plioceno resultó en la subducción de bajo ángulo de la Placa del Caribe por debajo del *ridge* de Curazao. Durante este tiempo, el frente de falla del anticlinorio de Falcón migró más lejos hacia el norte y cesó la extensión a lo largo de las fallas con orientación NW-SE. Los desplazamientos dextrales activos a lo largo de la falla de Boconó comienzan durante este periodo (Schubert y Sifontes, 1970). Este desplazamiento, aunado al continuo movimiento del sistema de fallas de Oca, resultan en la formación de un depocentro *pull-apart* al sureste de la cuenca de Falcón y espesores de sedimentación Plioceno.

Erlich y Barrett (1990), citado por Escorihuela y Rondón (2002), establecen que para la reconstrucción, el bloque de Margarita, el cual está delimitado por una línea imaginaria alrededor de Tobago-Margarita-Araya/Paria y parte norte de Trinidad (aproximadamente 100 a 125 Km.) se necesita mover cerca de 50 Km. la falla de Oca, y aproximadamente 50 Km. la falla de Bocono generando una clausura parcial

de la cuenca de Falcón, por lo que apoyan la tesis de Muessig (1978), para el modelo de génesis del bloque de Margarita. El movimiento diferencial producido por el arrastre a lo largo del margen sur del límite de la Placa Caribe-Suramericana causó extensión y transtensión en las cuencas de Falcón y Bonaire.

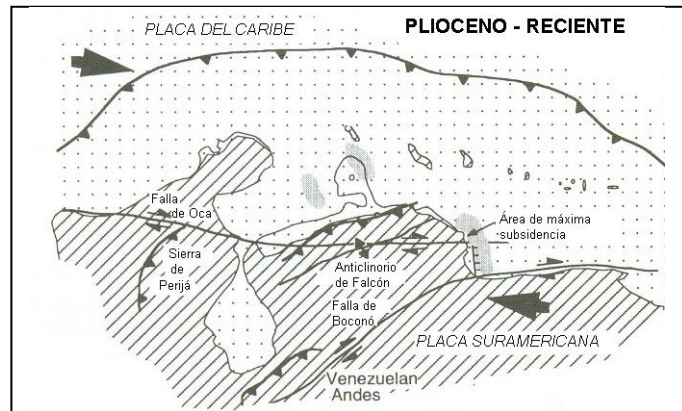


Figura 3.11. Modelo de generación de Cuencas *pull-apart* episuturales (suroeste Caribe) por el desplazamiento de las placas Caribe y Suramericana en el Plioceno-Reciente. Tomado y modificado de Macellari (1995).

Ostos (1990), indica que durante el Oligoceno, Falcón, Bonaire y la baja Goajira se desarrollaron como resultado de un fallamiento transcurrente dextral al norte de Sudamérica. Las ofiolitas de Siquisique, ubicadas al sur de Falcón, fueron empujadas hacia la misma dirección antes del desarrollo de la cuenca *pull-apart*. La falla de Oca (transcurrente dextral) pudo haber causado la compensación de la Península de la Goajira, aunque esta estuvo inactiva en el Oligoceno. El bloque Maracaibo-Santa Marta empezó a moverse al norte por la megacizalla de Boconó (Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano), relacionado al límite de subducción tipo andino en el oeste de Sudamérica, resultando en el desarrollo del cinturón deformado de Sur-Caribe (Case *et al.*, 1984), y fueron invadidos por los mares. Sin embargo las cuencas del golfe de La Vela y golfo Triste fueron levantadas en el Mioceno Tardío, lo cual esta relacionado a la reactivación de las fallas transcurrentes E-O o fallas con tendencia N-S o NE-SO (transcurrentes) conjugadas a la mega falla de Boconó (Ostos, 1990, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

La evolución tectónica del límite meridional de la Placa del Caribe durante el Plioceno-Cuaternario está caracterizada por las continuas migraciones hacia el norte y este del bloque Maracaibo-Santa Marta y el terreno transpresional respectivamente (Erlich y Barrett, 1990, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

Otras teorías sobre la evolución tectónica:

Gooddard y Boesi (1991), citado por Escorihuela y Rondón (2002), proponen un nuevo modelo conceptual de la cuenca de Falcón, para conocer el hábitat de hidrocarburo en la cuenca. El mismo está basado en la forma de bote de la cuenca con un eje este-oeste y una sección central angosta localizada entre los pueblos de Churuguara y San Luis; esta forma es la que determina la distribución sedimentaria de la cuenca durante el Oligoceno-Mioceno (ver figura 3.12). Este modelo incluye la tendencia noreste de los *horst* y canales mencionados, que son responsables por la extensión norte del desarrollo de la cuenca sedimentaria central.

El modelo estratigráfico y de sedimentación que proponen los autores para el relleno de la cuenca es el siguiente:

a) Eoceno Tardío: en el Eoceno la sedimentación continuó sin interrupción en otras regiones de Venezuela, y comenzó la formación de la cuenca de Falcón. También ocurrieron movimientos orogénicos en el sur Caribe, los cuales fueron responsables de la generación de las islas de Aruba, Bonaire y Curazao, que aun están presentes como remanentes hoy en la presente actualidad.

b) Oligoceno: con el incremento de la subsidencia, la cuenca tomo la forma de un elongado bote con un costado inclinado. Se desarrollaron surcos sinsedimentarios con orientación noroeste en el sector norte, con un sector angosto en el área central, estos pueden ser atribuidos a fuerzas desde el sur que empujaron la región entera otra vez y levantaron la región en la parte norte, al cual corresponde el Alto de Paraguaná (ver

figura 3.13). Las intrusiones ígneas y submarinas de flujos basálticos están en la parte más profunda de la cuenca, en surcos subsidiando, y son comunes en el sector norte.

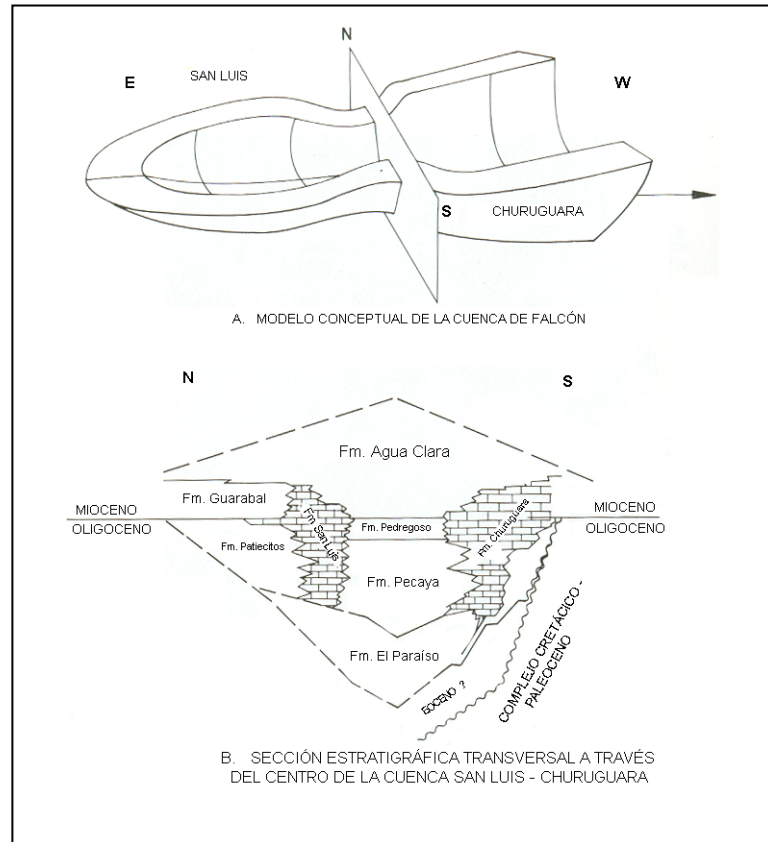


Figura 3.12 A) modelo original conceptual para la cuenca (después de González de Juana, 1980) y B) una compilación estratigráfica (después de Wheeler, 1963) basado sobre sección transversal a través del centro de la cuenca entre San Luis y Churuguara cuyas posiciones geográficas están mostradas en la figura. Tomado y modificado de Boesi y Goddard (1991).

c) Mioceno: los esfuerzos complejos comenzaron a incrementarse durante el Mioceno, causando sucesivas modificaciones paleogeográficas que transformaron la distribución de las facies que se encuentran hoy. Durante el Mioceno Temprano la trasgresión marina noreste llega a su fin. En el flanco norte y en la región Caribe, los surcos sinsedimentarios continuaron llenándose, así como continuó la subsidencia, estos factores están relacionados a la extensión tectónica. En la sedimentación del Mioceno Medio la actividad tectónica estuvo parcialmente controlada.

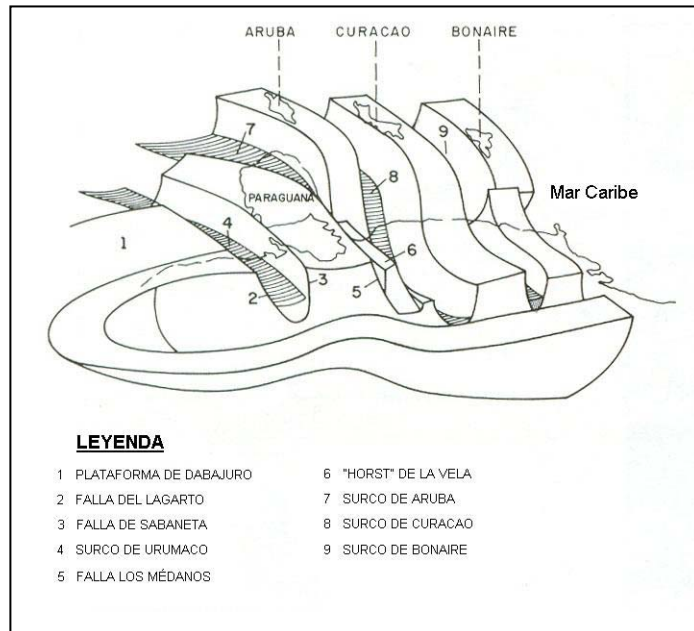


Figura 3.13 Modelo conceptual propuesto para la cuenca de Falcón. Tomado y modificado de Boesi y Goddard 1991).

La inversión de la cuenca que comenzó en este tiempo fue responsable por el levantamiento y erosión de los sedimentos que fueron depositados en el canal. 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 anticlinorio de Falcón. Esta fue la iniciación de las subcuencas y la separación del área en dos zonas distintas, hacia el sur facies marinas poco profundas, lagunal y sedimentos fluviales predominantemente, y hacia el norte se desarrollaron facies marino profundo a costera de transición.

Al final del Mioceno, movimientos tectónicos relacionados a movimientos laterales a lo largo del límite de placas Caribe-Sudamérica fueron evidentes. El área de depositación fue hacia el mar caribe y la sedimentación fue derivada principalmente del sur como de depósitos de reciclaje.

d) Plioceno: una tardía actividad tectónica tomó lugar en el Plioceno, afectando principalmente el área de Falcón, y fue responsable por el levantamiento del sistema montañoso. Los procesos sedimentarios responsables de las terrazas aluviales, costas y dunas a lo largo de la zona de piedemonte, posiblemente han sido afectados por la actividad tectónica. Un período orogénico también ocurrió durante el Pleistoceno, procesos similares fueron repetidos. Esta repetición resultó en un número de terrazas de diferentes edades, pero con el mismo desarrollo de deposición. Estas pueden ser observadas hoy a lo largo del entero llano costero. Los autores muestran en la figura 3.14, muestra tres cortes esquemáticos para la interpretación de la cuenca.

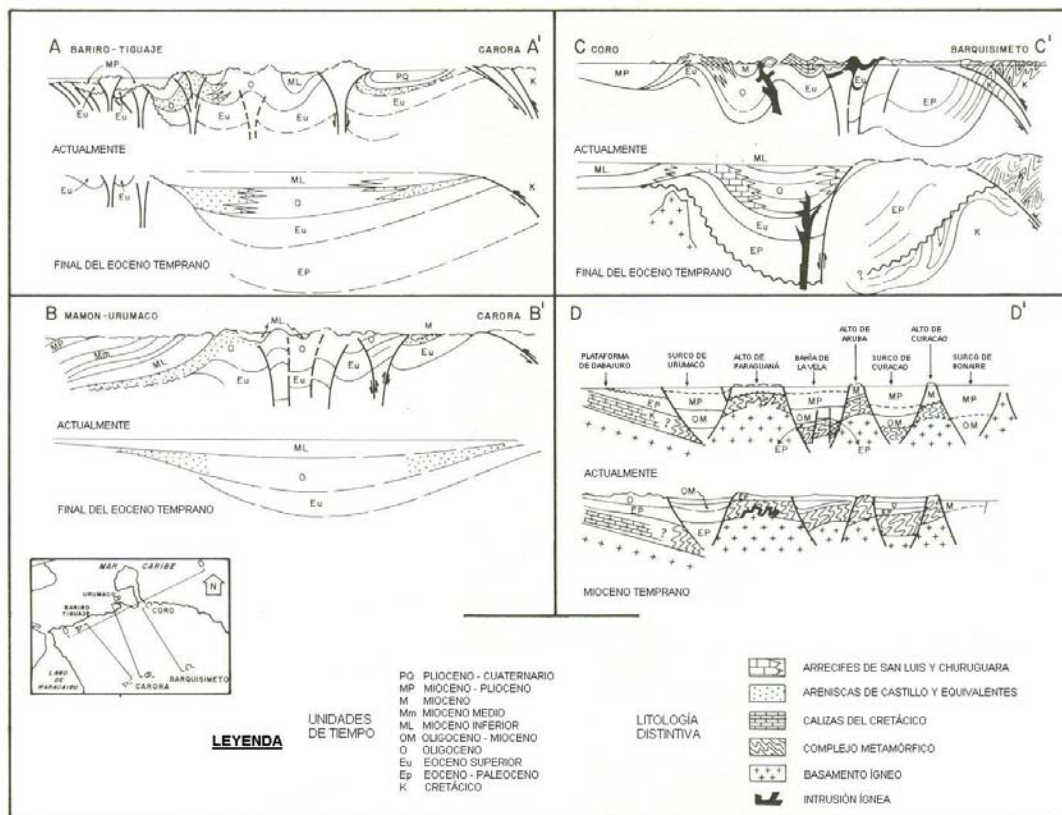


Figura 3.14 Secciones esquemáticas a través de la cuenca de Falcón. Tres secciones trasversales noroeste-sureste (A-A', B-B', C-C') mostrando extensión y compresión y una sección longitudinal (D-D') mostrando continuidad de la extensión. Tomado y modificado de Boesi y Goddard (1991).

Audemard (1995), citado por Escorihuela y Rondón (2002), señala en trabajos anteriores que el desplazamiento hacia el norte de la sedimentación, y hacia la parte



norte de la cuenca de Falcón evidencia claramente el proceso de inversión de la cuenca, este proceso fue previamente propuesto por Audemard y De Mena (1985), por Testamark *et al.* (1986), y por Goddard y Boesi (1991).

Audemard (1995), resume la evolución tectónica de la Cuenca de Falcón en las siguientes fases:

*Fase 1:* 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 esta orientado N15W. 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, esta representada por los depósitos lutíticos neríticos de la Formación Agua Clara, de edad Mioceno Temprano.

*Fase 2:* El cierre de la cuenca de Falcón se inició en el límite entre el Mioceno Temprano y el Mioceno Medio, distinguiendo tres etapas diferentes de edad, desde un punto de vista amplio, como lo son:

a) Mioceno Medio a Tardío: durante este tiempo la cuenca sufrió un proceso de inversión tectónica originado por un campo de esfuerzos mínimo y máximo sub-horizontales, este es el régimen que permite estructurar la cuenca e 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.

b) 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 desde el límite Mioceno-Plioceno.

c) Plioceno-Pleistoceno (Cuaternario): es la fase responsable de la configuración actual de la cuenca, y continua activa hoy en día. Ella constituye la última de una

trilogía de fases compresivas caracterizadas por esfuerzos máximos que siempre han estado ubicados en el cuadrante NO.

Porras (2000), menciona que el origen de la cuenca de Falcón-Bonaire esta asociado a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca de retroarco (*back arc*), en un orógeno de flotación que colisionó oblicuamente con el extremo norooccidental de la Placa Suramericana, suturándose diacrónicamente de oeste a este, desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano. Este modelo esta basado en el esquema del orógeno en flotación de Oldow *et al.* (1990), en el cual pueden ocurrir simultáneamente desplazamientos transcurrentes (paralelos a la sutura), y contracciones (perpendiculares a la sutura) (Porras, 2000, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

Estos autores indican la existencia de estos sistemas de cuencas de ante arco (*fore arc*), y retro-arco (*back arc*), que se desarrollan en los márgenes convergentes. El autor identifica tres períodos principales:

a) Un período de extensión: que va desde el Eoceno Tardío hasta la parte media del Mioceno Temprano. En este tiempo se comienza a general la cuenca Falcón-Bonaire, como un colapso tectónico detrás de la colisión entre las placas Caribe y Suramericana, a partir de este proceso se comienzan a generar estructuras extensionales tipo *graben*.

b) La fase compresiva: comenzó hacia finales del Mioceno Temprano e inicios del Mioceno Medio. No es si no hacia el Mioceno Medio que esta fase comienza a afectar a la cuenca, por efecto de la orogénesis andina, causando la inversión tectónica de la porción centro-occidental de la cuenca (anticlinorio de Falcón). Los efectos de la compresión andina generaron el desarrollo de fallas inversas o corrimientos con vergencia norte-noreste, las cuales cortan la sección terciaria, generando pliegues de dirección noroeste-sureste.

c) Desarrollo simultáneo de estructuras compresivas y distensivas: Plioceno Tardío-Reciente. Durante este período, el margen entre las placas presenta una componente mayormente transcurrente en dirección este-oeste. Estos movimientos generaron estructuras de grandes dimensiones, donde se observan efectos transpresivos y transtensivos contemporáneos.

### **Rocas ígneas de la cuenca de Falcón**

Dentro de la cuenca central de Falcón, los cuerpos ígneos basálticos cortan en dirección noreste unos 50 km, formando un cinturón de unos 10 km (inédito de la Compañía Shell de Venezuela; Brueren, 1949; Coronel, 1970). Los afloramientos modelos, las formas estructurales, y la presencia de límites de zona con los márgenes ígneos, contactos metamórficos, inclusiones de rocas sedimentarias en forma local, y brechas, se encuentran bien documentados por Muessig (1979). Estos cuerpos intrusionan rocas sedimentarias del Oligoceno, como lo son niveles bajos de *sills* y *plugs* o flujos extrusivos. Por medio del análisis isotópico de un *sill* traquibasáltico, estas intrusiones tienen una edad de  $22.9 \pm 0.9$  m.a (Muessig, 1978). Esta edad es 5 M.a más joven que la reportada de los análisis paleontológicos hechos a las rocas que rodean estos cuerpos ígneos (Muessig, 1984).

Una gran actividad ígnea pudo ser inferida desde 28 a 23 M.a, con respecto a los contactos estratigráficos. Las rocas ígneas de Falcón son más jóvenes, y distintivas en morfología, composición y origen, como el bloque ofiolíticos de Siquisique (35 km al sur), y el máfico ígneo-metamórfico de Paraguaná (100 km al norte) (Muessig, 1984).

Las rocas ígneas de Falcón son similares en petrología a otras suites de rocas ígneas del continente, y se encuentran asociadas con ambientes tectónicos extensionales. Esta *suite* ígnea se encuentra conformada por un 98% de rocas basálticas, y en donde solo menos de un 2 % son rocas félsicas, encontrándose en menor abundancia. Surtidos xenolitos y megacristales anfibolíticos son abundantes en lavas basálticas

alcalinas cerca de las ventanas de Atravesado, La Azulita, El Sol y Paraguachoa (ver figura 3.15) (Muessig, 1984).

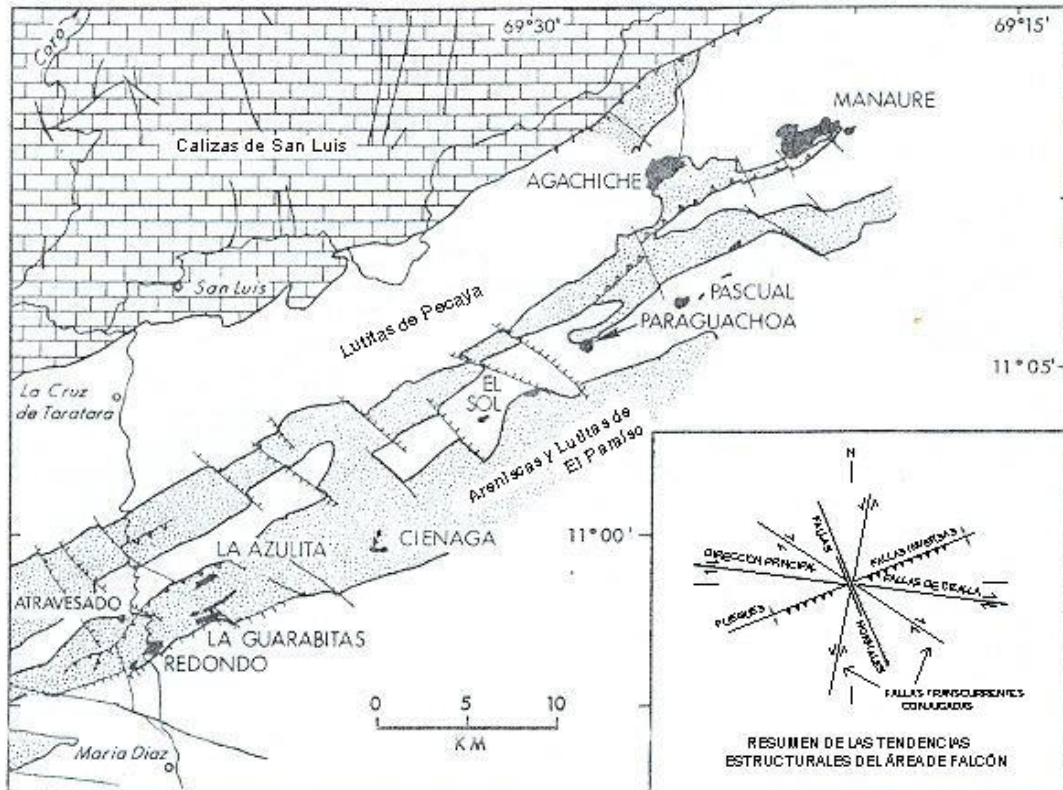


Figura 3.15 Mapa geológico de rocas ígneas en Falcón central. En negro se muestran las intrusiones y extrusiones ígneas. En el recuadro se observa un resumen de los componentes estructurales en la Cuenca de Falcón. Tomado y modificado de Muessig (1984).

Brueren (1949), citado por Escorihuela y Rondón (2002), describe de manera más local, en la parte central de la cuenca de Falcón, los cuerpos ígneos según su morfología, como cerros, y dice sus características ígneas más importantes:

a) Cerro Manaure: es un cuerpo masivo con varios topes, y una pared empinada al sureste.

b) Cerro Pascual: es un tipo de gabro muy tosco, ligeramente grisáceo, y muestra cristales de varios centímetros de largo, de mineral de hierro titanio.

c) Cerro Paujicito: es un cerro compuesto por un peculiar tipo de roca, y esta presenta ligeras venas coloreadas en la masa rocosa oscura.

d) Cerro Paraguachoa: es un cerro compuesto por una roca piroclástica, principalmente compuesta por fragmento de rocas ígneas meteorizadas (probablemente basaltos), embebidos en material volcánico fino de la misma composición.

e) Cerro Atravesado: compuesto de una roca ígnea densa de color grisáceo oscuro. Algunos cristales son visibles y parecen estar completamente alterados.

Los cerros Redondo, Mataire, El Arco, Alonzo, Pacual Paraguachoa y El Sol son empinados con forma cónica, mientras que Paujicito, muestra forma oval. El cerro La Cienaga representa el punto topográfico más alto, y sobre estas rocas ígneas se depositan sedimentos transgresivos. Son menos compiscuos los *sills* de Las Guarabitas, ubicados en el pueblo con este mismo nombre, y tres pequeños topes ígneos ubicados al norte de Cerro Atravesado. El afloramiento de Guay Grande, ubicado al este de Cerro Pascual y norte del Cerro La Cienaga, topográficamente no representan un relieve marcado, y todo esto lleva a suponer que pueden existir *sills* acuñados en esta área y para esto debe hacerse una investigación más a fondo. Muessig (1978), mediante análisis isotópicos de potasio-argón (K/Ar) de un *sills* traquiblastico del Cerro La Cienaga obtuvo una edad de  $22.9 \pm 0.9$  M.a. (Escorihuela y Rondón, 2002).

Coronel (1970), define un contacto entre rocas en el área de Las Guarabitas, donde puede observarse claramente que las rocas ígneas están intrusionando las sedimentarias. Los sedimentos cerca del contacto están recristalizados y tienen

apariencias de *hornfels*. La estratificación está aun visible. Las areniscas cuarcíticas tienden a hacerse mas densas y más oscuras, mientras que las pizarras de contacto presentan un color amarillento sucio y franjas de cuarzo oscuro. Lejos del contacto los sedimentos retienen su color original. Las Guarabitas presentan un *sills* intrusivo. Se observan localmente aureolas de contacto, donde las rocas sedimentarias han sufrido fuerte alteración termal (*hornfels*) (Coronel, 1970, citado por Escorihuela y Rondón 2002).

Según Coronel (1970), las rocas ígneas vistas en el área de Aracua reflejan una zona de debilidad en el eje El Paraíso-Pecaya en la cuenca de Falcón central. Una teoría generalmente aceptada asume que un magma básico esta intrusionando o extrusionando en porciones profundas de una cuenca subsidente. Esto implicaría que esta área recibió un gran aporte de sedimentos durante el período de la sedimentación de las formaciones El Paraíso y Pecaya, por lo que los mismos no eran sólidos.

En los cerros Manaure y Agachiche se observan grandes inclusiones de pizarras en las rocas ígneas, existen evidencias de que estos cuerpos estuvieron en fase liquida cuando extrusionaron, y los contactos fueron estabilizados. Grandes brechas ígneas con bloques de cuarcita y pizarra son también halladas en estas áreas. Coronel (1970), también dice que los cerros Manaure y Agachiche están intrusionando a las lutitas de la Formación El Paraíso y a los lentes limolíticos de la Formación Pecaya, al norte del Cerro Manaure, y que estos han sido interrumpidos y elevados localmente por esta intrusión (Coronel, 1970, citado por Escorihuela y Rondón, 2002).

La posición de las rocas ígneas y su concordancia con las rocas sedimentarias es comentada por Coronel (1970), los *sills* de Las Guarabitas están localmente paralelos a los planos o estratos de las rocas de la Formación El Paraíso. Sedimentos cerca del contacto con las ígneas han sufrido algún metamorfismo hidrotermal. La forma de muchos de los afloramientos ígneos, sugieren carácter intrusivo (Coronel 1970, citado por Escorihuela y Rondón (2002).

Contactos no intrusivos han sido hallados, excepto en Cerro La Cienaga, donde El Paraíso esta descansando por encima del cuerpo ígneo. Una zanja en la cresta de la colina muestra cerca de unos dos metros de cuarcitas delgadas, algunos 40 metros de rocas ígneas erosionadas y finalmente, la dolerita (diabasa) fresca; lo cual lleva a afirmar que la actividad ígnea estaba restringida en tiempo de la depositación de la Formación El Paraíso (Escorihuela y Rondón, 2002).

---

---

## CAPÍTULO IV

### GEOLOGÍA LOCAL

#### CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS Y GEOMORFOLÓGICAS

La zona de estudio tiene un área de 49 km<sup>2</sup> aproximadamente, en la cual se encuentran ubicados los cuatro afloramientos estudiados a detalle para este trabajo, y que se disponen espacialmente a lo largo del río Paraíso o Pecaya. La parte más al sur del área de estudio se encuentra cerca del poblado de Las Adjuntas, donde se ubica el primer afloramiento, mientras que la parte más norte se ubica en las cercanías de la población del Paraíso, donde se encuentra el cuarto y último afloramiento estudiado (ver anexo 1).

El paisaje observado en el área de estudio es de tipo mixto, está compuesto por una parte montañosa y una parte llana. La parte montañosa representa el 65% del área; aproximadamente unos 31,85 km<sup>2</sup>, mientras que la parte llana abarca el 35% restante de la zona en estudio; cerca de 17,15 km<sup>2</sup>.

El paisaje montañoso se caracteriza por presentar dos filas subparalelas con dirección N70E y ubicadas en la parte sur de la zona. Además de dichas filas se aprecia un conjunto de montañas y cerros ubicados al noreste, centro y sureste de la región (ver anexo 1).

La fila que se encuentra más al sur se presenta cruzando toda el área de estudio, se caracteriza por tener una línea de cresta irregular, con alturas máximas de 450 metros sobre el nivel medio del mar y mínimas en 260 metros. Presenta declive en ambas direcciones según la dirección que esta sigue, y su línea de cresta es de tipo irregular. La forma de la cresta es aguda, presentando picos o quiebres bastante definidos a lo largo de la línea de cresta, esto quizás debido a la densidad y grado de entallamiento



del drenaje, el cual es muy marcado a lo largo de sus laderas. Esta fila es atravesada por el cauce del río Paraíso o Pecaya en su parte central, dividiéndola en dos partes.

Las laderas de esta fila son de forma simétrica a lo largo de toda su extensión, sin embargo en su parte suroeste se encuentran más suavizadas mientras que en su parte sureste son más abruptas. Las estribaciones que se desprenden se encuentran definidas por los diferentes drenajes que descienden de las partes más altas de la fila, y éstas se encuentran formando ángulos mayores de 60 grados con respecto a la orientación del eje de la fila. La línea de cresta de estas estribaciones son irregulares, y las formas de la crestas son agudas. El drenaje en estos ramales se aprecia también bastante entallado.

La segunda fila se ubica al norte de la primera, posee una extensión de 3 km de largo aproximadamente, teniendo sus mayores alturas en 380 metros sobre el nivel medio del mar y sus mínimas en 240 metros. La línea de cresta de esta fila al igual que la fila anterior es irregular, y presenta declive en ambas direcciones según la orientación de la fila. La forma de la cresta es aguda, y las laderas de esta fila son abruptas.

El drenaje de esta fila se aprecia fuertemente entallado a lo largo de sus laderas, y las estribaciones o ramales que de esta se desprenden son muy poco marcadas y casi imperceptibles.

Al este de la fila antes descrita se encuentra el cerro La Bandera, el cual alcanza su mayor altura en 480 metros sobre el nivel medio del mar, y su menor en 280 metros. Posee una cresta de tipo alargada y amesetada, mientras que las laderas son simétricas y bastante suavizadas.

El drenaje correspondiente a este cerro es poco denso y no se aprecia muy marcado a lo largo de sus laderas. De este cerro surgen varios ramales que no tienen un patrón

espacial definido, y que se pueden inferir como producto de las diferentes redes de drenaje que bajan desde las partes más altas de esta estructura.

Al norte del cerro La Bandera se pueden visualizar un conjunto de pequeños cerros o lomas, con alturas máximas entre 260 y 300 metros sobre el nivel medio del mar. Dicho conjunto de cerros poseen crestas amesetadas, sus laderas son asimétricas y muy suavizadas.

Así mismo, este conjunto de cerros se encuentra siendo atravesado por una serie de drenajes secundarios que se desprenden de una red principal; quebrada El Lindero o Agua Colorada al noreste, y es limitado por el caudal del río Paraíso o Pecaya al oeste.

En la parte noroeste del área de estudio se puede ver una zona llana, que se puede interpretar como una terraza aluvial, y que tiene un área aproximada de unos 12.25 km<sup>2</sup>. Posee sus alturas máximas en 270 metros sobre el nivel medio del mar, y sus mínimas en 220 metros, colindando al sur con la fila que se encuentra al oeste del cerro La Bandera, con los pequeños cerros al este, y con el cerro La Bocaina al norte.

Tiene una pendiente muy poco pronunciada en sentido sur-norte según el descenso de los drenajes, los cuales se encuentran fuertemente entallados a lo largo y ancho de esta planicie, convirtiéndose así estos en drenajes secundarios que surten al río Paraíso o Pecaya al este, y a la quebrada El Mamoncito al norte.

En la parte suroeste, donde se desarrollan los ríos Juan Negro y Pecaya también se puede ver otra planicie o llanura de inundación, en las faldas de la fila que se encuentra en esa zona, posee un área de aproximadamente de 4.9 km<sup>2</sup>. Esta planicie tiene sus máximas alturas en 250 metros sobre el nivel medio del mar, y su pendiente se encuentra ajustada a los niveles de descenso de los ríos que por ella pasan formando una especie de cono de deyección.

Los drenajes secundarios que sobre esta llanura se encuentran se presentan bastante marcados, pudiéndose tomar como una superficie de erosión que arrastra los sedimentos al cause principal.

Con respecto al drenaje en forma general, se puede apreciar que el área de estudio es atravesada por una cuenca principal con dirección N20O-S20E, conocida como el río Paraíso o Pecaya, y que presenta una longitud aproximada de 6 km en forma sinuosa de norte a sur, hasta 1.3 km al suroeste de la población de Las Adjuntas, en donde este drenaje se divide y se aprecia el río Juan Negro, el cual es un afluente del río Pecaya.

El río Paraíso o Pecaya posee un sentido de la corriente desde aguas arriba al sur, hacia aguas abajo al norte. La geometría de este curso principal es, a lo largo de su recorrido, marcadamente meandriforme, observándose algunos quiebres o cambios de dirección notorios al suroeste de la población de Paraíso Arriba, así como también al noreste de la población de Flor de Areque. Al este y noreste de la población de Las Daras, se observa que la dirección de este río se torna este-oeste.

El río Paraíso o Pecaya se encuentra atravesando, o si se quiere cortando, toda las morfoestructuras por donde éste pasa. Se puede notar claramente en las filas y en el Cerro La Bandera, en donde este drenaje de cierta forma corta estas estructuras y las modela.

Se pueden apreciar un conjunto de afluentes secundarios que presentan un alto grado de densidad y envergadura en toda la zona de estudio, siendo estos la quebrada El Mamoncito, quebrada El Lindero o Agua Colorada al norte, quebrada de De Pifano, la quebrada de Yeria en la parte sur-central, y el río Juan Negro al sur.

Las características fisiográficas y geomorfológicos descritas anteriormente pueden ser observadas en el anexo 1.

## DESCRIPCIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS ESTUDIADOS

### Afloramiento # 1

Este afloramiento se encuentra expuesto en la parte más al sur del área de estudio, a unos 300 metros al sureste de la población de Las Adjuntas, al este del río Pecaya y ubicado entre las coordenadas UTM 412654E; 1205725N y 412603E; 1205840N, a una altura promedio sobre el nivel del mar de 241 metros, con una longitud horizontal de 119.84 m, representando un área aproximada de 2396.8 m<sup>2</sup> (ver anexo 1).

Esta tramo de la zona de estudio conforma la parte basal de la sección superior de la Formación El Paraíso, y posee un espesor verdadero de 114.98 metros aproximadamente. En este afloramiento se tomaron las muestras que van desde MQP-1 a la MQP-40 para el posterior análisis químico (ver anexo 3).

Esta zona se encuentra litológicamente definida por una alternancia casi rítmica de lutitas laminadas de color negro en su gran mayoría, y areniscas de grano muy fino a fino de color gris oscuro y negro (ver figura 4.1).

La distribución porcentual de los litotipos que componen este afloramiento se puede distribuir de la siguiente manera: 71% de lutitas negras laminadas, y un 29% de areniscas de grano muy fino a fino grises oscuras y negras. Este cálculo se realizó en base al espesor verdadero de este afloramiento, y en la forma en la que se encuentran dispuestos los diferentes espesores por facies.



Figura 4.1. Parte basal del afloramiento #1. Rumbo E-O

## **Afloramiento # 2**

Este afloramiento se encuentra ubicado en la parte central del transecto que definen las cuatro secuencias que componen la sección tipo del área de estudio. Es separado del primer afloramiento por una zona considerada cubierta de 220 metros aproximadamente, y sobre la cual descansan sedimentos aluviales o cuaternarios. Así mismo, se encontraron aflorando un conjunto de pliegues que pertenecen a la Formación El Paraíso, y que se describirán de manera más detallada en el Afloramiento # 4, en donde estos afloran de mejor manera. Así mismo, se encontró un lente de la Formación Pecaya en la parte sur de este afloramiento, apreciándose aquí el contacto entre las formaciones de manera concordante y que se refleja de manera clara en el anexo 2.

Este afloramiento se sitúa a unos 200 metros al noreste de la población de Paraíso Arriba, y a unos 200 metros al suroeste de la intersección de la quebrada de De Pifano con el río Paraíso o Pecaya. Esta secuencia viene a ser el flanco sur del anticlinal que define al Cerro La Bandera en su zona de inmersión al sureste, y se encuentra entre las coordenadas UTM 411747E; 1207585N y 411614E; 1207862N, siendo las primeras las del eje axial, mientras que las segundas corresponden al limbo norte del anticlinal, con una altura promedio sobre el nivel del mar de 240 metros, una longitud horizontal de 273 metros aproximadamente, y un área de 5460 m<sup>2</sup> (ver anexo 2).

Esta secuencia conforma una pequeña fracción de la parte inferior y un fragmento de la parte media de la sección total que define la zona de estudio, teniendo un espesor verdadero de 212 metros. Así mismo, se tomaron las muestras que van desde MQP-375 a MQP-666 para su respectivo estudio y análisis químico (ver anexo 3).

Esta zona, al igual que el afloramiento # 1 se encuentra litológicamente definida por una alternancia rítmica de lutitas laminadas de color negro, y areniscas de grano muy fino a fino de color gris oscuro y negro (ver figura 4.2).

La distribución de las diferentes litologías presentes en este es la siguiente: 64% de lutitas negras laminadas y lutitas carbonosas, y un 36% de areniscas de grano fino, grises oscuras y negras.



Figura 4.2. Parte media del afloramiento #2 Rumbo N70E

### **Afloramiento # 3**

El afloramiento abarca la parte central y superior del transecto que definen las cuatro secuencias que componen al área de estudio. Se encuentra separado del segundo

afloramiento por una zona cubierta de unos 110 metros aproximadamente de espesor, que se consideran sedimentos y restos de tipo aluvional y recientes.

Este afloramiento se encuentra en una zona conocida como El Paso, en donde se encuentra la intersección de una vía o carretera de tierra con el cauce del río Paraíso o Pecaya, específicamente entre las coordenadas UTM 411375E; 1208059N en su parte basal y 411529E; 1208841N en lo que es el tope de este afloramiento. Esta sección posee una altura promedio sobre el nivel medio del mar de 220 metros, una longitud horizontal de 367 metros aproximadamente, y un área estimada en 7340 m<sup>2</sup> (ver anexo 2).

En este afloramiento se recogieron las muestras que van desde MQP-400 a MQP-514 para su posterior análisis químico.

A diferencia de los dos anteriores, el afloramiento se encuentra litológicamente definido por areniscas de grano muy fino a fino, lutitas negras laminadas, lutitas carbonosas, y la presencia de carbones con jarosita. Estas facies se alternan y se repiten sucesivamente en la parte basal (ver figura 4.3) y media de esta sección (ver figura 4.4). Hacia el tope las areniscas son más frecuentes, teniendo mayores espesores y tamaño de grano, mientras que los carbones también tienden a aumentar sus espesores (ver figura 4.5). Estas características hacen notar la diferencia clara de esta secuencia con respecto a las descritas anteriormente (ver anexo 3).



Figura 4.3. Parte basal del afloramiento #3. Rumbo N70O





Figura 4.4. Parte media del afloramiento #3. Rumbo N700



Figura 4.5. Parte superior del afloramiento #3. Rumbo N700

En cuanto a la distribución porcentual de las diferentes facies que componen a este afloramiento, con respecto a un 100% se tiene que: el 39.96% pertenece a las areniscas de grano fino y de grano medio que aquí se encuentran, un 55.47% son lutitas laminadas y carbonosas, y un 4.57% son carbones.

#### **Afloramiento # 4**

Este afloramiento se ubica en la zona más al norte de nuestra área de estudio sobre el río Paraíso o Pecaya. Se encuentra separado del afloramiento # 3 por un cubierto de más de 70 metros de espesor horizontal, y que en espesor verdadero representa unos 20 metros en la columna estratigráfica.

De manera más puntual, este afloramiento se ubica a unos 100 metros al norte de la zona conocida como El Paso, en la parte este del cause del río Paraíso o Pecaya, entre las coordenadas UTM 411659E; 1208575N en su parte basal y 411600E; 1208700N en su extremo más al norte, con una altura promedio sobre el nivel medio del mar de



200 metros, una longitud horizontal de 132.70 metros, y un área aproximada de unos 2654 m<sup>2</sup> (ver anexo 2).

Este afloramiento representa el tope de la secuencia en estudio, y en este se tomaron las muestras que van desde la MQP-700 a MQP-744 para su análisis químico (ver anexo 3).

Esta sección se encuentra dominada por las lutitas. Dichas lutitas se disponen intercaladas con capas de areniscas, así como también algunas capas de carbón de espesores muy reducidos. Hacia el tope de este afloramiento se encuentra una pequeña capa de arenisca con restos fósiles, la cual es la única característica carbonática vista en toda la secuencia en estudio.

La distribución de las diferentes facies que componen este afloramiento se distribuye de la siguiente manera: 35.69% de areniscas de grano fino y lentes de igual característica, 63.19% es representado por lutitas laminadas de color negro, 0.71% de capas de carbón, y en proporción aún menor un 0.41% de arenisca calcárea.

## **DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE UNIDADES LITOLÓGICAS**

La sección de estudio se encuentra definida por cuatro afloramientos previamente descritos, los cuales se consideran como la sección superior de la Formación El Paraíso que aflora en la quebrada Paraíso o Pecaya.

El espesor de esta sección consta de 745 metros aproximadamente, en esta se halla la siguiente distribución porcentual de litologías: 63.36% de lutitas negras laminadas y masivas, un 35.22% de areniscas y lentes de areniscas, un 1.32% de capas de carbón, y un pequeño 0.40% de areniscas con restos fósiles (ver anexo 3).

Observando la distribución de los tipos litológicos que se encuentran a lo largo de la sección de estudio, su disposición, la relación existente entre estos, las características propias de cada uno, se realizó la división del transecto levantado en dos unidades litológicas informales para su descripción y caracterización.

### **Unidad Litológica UL1**

Esta unidad se encuentra definida por los afloramientos 1 y 2 ubicados en la parte más al sur del área de estudio sobre la quebrada o río Paraíso o Pecaya. Se encuentra aflorando en la estribación de una fila en su parte más basal y en el flanco norte de un anticlinal conocido como el cerro La Bandera. La longitud de esta unidad es de unos 400 metros aproximadamente, con una zona cubierta por aluviones del río Paraíso o Pecaya y lentes de la Formación Pecaya de unos 220 metros aproximadamente, los cuales se encuentran dispuestos en una zona sinforme como expresión topográfica.

Está compuesta por una alternancia litológica monótona, que incluye lutitas laminadas y masivas, areniscas cuarzosas o lentes de areniscas, siendo la litología dominante las lutitas en casi toda la unidad (ver anexo 3).

Las lutitas laminadas y masivas de esta unidad son duras y compactas, presentan un color fresco gris oscuro a negro y meteorizan a marrón claro y gris claro en la base, mientras que a medida que avanza hacia el tope los colores meteorizados tienden a ser gris oscuro y violáceos. Los espesores de las lutitas son variados, en algunos casos de 5 a 10 centímetros y llegando a convertirse en paquetes de hasta 15 metros.

En estas lutitas se pueden observar gran cantidad de nódulos de óxido que varían de 2 a 8 centímetros de diámetro. Además, se observaron vetas de cuarzo así como también gran cantidad de láminas de yeso.

Las capas y lentes de areniscas que afloran en esta unidad presentan colores frescos que van de gris claro a gris oscuro y en algunos casos de color negro, meteorizando a gris oscuro, marrón, rojizo y violáceo. Son de grano muy fino en la base, y a medida que se avanza hacia el tope se hacen de grano muy fino a fino. En esta unidad los espesores varían entre los 2 a 5 centímetros en la base y aumentan hacia el tope, llegando a alcanzar los 20 a 40 centímetros aproximadamente. Así mismo, se observan más lentes de areniscas que capas o estratos de estas.

Estas areniscas presentan nódulos de óxidos, láminas de yeso, y algunas presentan restos de jarosita. En la parte basal se observa laminación paralela en las areniscas de grano muy fino, mientras que hacia el tope de la unidad existe un conjunto de estratos de areniscas cuarzosas de grano muy fino a fino que presentan rizaduras en el tope y huellas de carga en la base.

El contacto litológico que se presenta en esta unidad es de tipo abrupto, no se aprecia un cambio transicional del tamaño de grano entre las litologías antes descritas.

Esta unidad litológica tiene un espesor aproximado de 326.98 metros, teniendo la siguiente distribución de los diferentes litotipos presentes: 67.50% de lutitas laminadas y masivas, y un 32.50% de areniscas y lentes de areniscas.

### **Unidad Litológica UL2**

Esta unidad está compuesta por los afloramientos número 3 y 4, ubicados en la parte media y superior del transecto que se definió sobre la quebrada o río Paraíso o Pecaya. La extensión geográfica es de 580 metros aproximadamente hasta el tope de la unidad, y en ésta se encuentra un tramo constituido por un sinforme cubierto por una serie de sedimentos aluvionales transportados por el río Paraíso o Pecaya.

Esta secuencia estratigráfica se encuentra definida por una alternancia de lutitas laminadas, masivas y carbonosas (estas últimas en menor proporción), areniscas cuarzosas de grano muy fino a fino, areniscas negras de granos muy finos, areniscas con restos fósiles, lentes de areniscas y capas de carbón (ver anexo 3).

Las lutitas laminadas y masivas presentan colores frescos gris oscuro y negro, meteorizando a tonos grises, rojizos, marrones y violáceos. En cuanto a las lutitas carbonosas, estas presentan color fresco negro mate y meteorizan a rojizo y amarillento.

Los espesores de las lutitas son variados, los más delgados van de 2 a 4 centímetros y se encuentran intercalados con capas de areniscas. Los mayores espesores se encuentran ubicados desde la parte media hacia el tope, alcanzan hasta 12 metros y generalmente presentan lentes de areniscas entre estos.

En las lutitas laminadas y masivas descritas anteriormente se presentan gran cantidad de nódulos de óxidos a lo largo de toda la secuencia (ver figura 4.6). El diámetro de dichos nódulos varía de 2 a 20 centímetros, y los de mayor tamaño se ubican desde la parte media hacia el tope. Además, se observan láminas de yeso, vetas de cuarzo, y hacia el tope de la unidad una serie de pequeñas vetas de calcita. Por su parte las lutitas carbonosas presentan gran cantidad de óxidos y restos de jarosita.

Las areniscas que se encuentran en esta unidad se presentan en forma de pequeñas láminas, capas gruesas y lentes. La mayoría de estas areniscas, específicamente las más competentes, son de grano muy fino a fino, cuarzosas y muy duras, y se encuentran en la parte basal y media de la unidad, específicamente en el afloramiento # 3. Existe otro conjunto de areniscas de grano muy fino con restos fósiles que se ubican hacia el tope, siendo estas compactas y homogéneas.



Figura 4.6. Nódulos de óxidos presentes a lo largo de la Unidad Litológica #2.

Los colores frescos de dichas areniscas varían desde blanquecinos a marrones muy claros, grises claros a oscuros y negros, los cuales se encuentran meteorizando a grises oscuros, rojizos, violáceos y morados.

Los espesores de las areniscas son muy variados, en la base se observan espesores que oscilan entre los 50 y 60 centímetros para las capas más gruesas y de 2 a 4 centímetros para las menores capas, que se intercalan con lutitas y capas de carbón en forma ocasional.

En la parte media de la unidad se observan los mayores espesores que alcanzan hasta 3.5 metros, mientras que hacia el tope se observan lentes y capas de areniscas entre 2 y 70 centímetros de espesor.

Las areniscas presentan nódulos de óxido de diferentes diámetros, concreciones y láminas de yeso a lo largo de toda la unidad. Hacia el tope se observan dos capas de

arenisca de grano muy fino de color negro, las cuales presentan marcas de fósiles y conchas, y contienen pequeñas vetas de calcita entre sus fracturas. Entre las dos capas antes descritas se encuentra una arenisca conchífera calcárea.

En cuanto a las estructuras sedimentarias, las areniscas presentan estratificación cruzada, rizaduras de corriente y huellas de carga, siendo las que presentan estas características físicas las de mayor espesor y las que se ubican casi en su totalidad en el afloramiento #3. Las areniscas que presentan tamaño de grano muy fino presentan solo laminación paralela.

Los carbones presentes en esta unidad son de color fresco negro muy brillante a negro mate, y meteorizan a colores rojizos y amarillentos. Estos se pueden encontrar como capas muy delgadas en la base y el tope con un espesor entre 5 y 10, mientras que en la parte central de la secuencia pueden alcanzar espesores de 1 a 1.5 metros.

Al igual que en la unidad litológica UL1 el contacto litológico es de tipo abrupto, no se aprecia un cambio transicional del tamaño de grano entre las litologías antes descritas.

El espesor de esta secuencia estratigráfica es de 418.97 metros aproximadamente, con una distribución de tipos litológicos de la siguiente manera: 59.33% de lutitas laminadas, masivas y carbonosas, un 37.90% de areniscas de grano muy fino a fino, lentes de areniscas y arenisca fosilífera, y un 2.64% de carbón.

## **GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL**

La descripción de la geología estructural local de la sección de estudio solo referirá el modelo estructural general con respecto a la geometría de la formación aflorante, como se encuentra dada su orientación geológica y buzamientos, como se relaciona

con la topografía, y como es la afinidad de litologías presentes en la sección con la morfología de estructuras presentes.

La región central de la cuenca de Falcón se caracteriza por una serie de largos pliegues con rumbo aproximado de N70E, que constituyen lo que se ha denominado como el anticlinorio de Falcón (Díaz de Gamero, 1977).

La zona de estudio, donde se encuentra aflorando la sección superior de la Formación El Paraíso se encuentra intensamente deformada, presenta un conjunto de anticlinales y sinclinales que se aprecian a lo largo de toda la quebrada Paraíso (ver anexo 4).

La Formación El Paraíso se encuentra aflorando en el conjunto de anticlinales que se desarrollan a lo largo de toda la sección (ver anexo 2). Al sur de la unidad de estudio el afloramiento #1 presenta un rumbo promedio de sus capas de N70E, y se encuentran buzando 70° al norte. Este afloramiento se encuentra en el flanco norte de un anticlinal que es cortado por la quebrada Paraíso.

Hacia el norte de la quebrada, se observa el afloramiento #2 en el núcleo de un anticlinal que posee una dirección N75E, y cuyos limbos buzan 40° al sur y norte respectivamente.

Los afloramientos #3 y #4 se observan en el núcleo de una estructura anticlinal, conocida como el Cerro La Bandera. El afloramiento #3 es considerado como la sección tipo de la sección superior de la Formación El Paraíso, tiene una orientación promedio N75E y un buzamiento de 70° al norte. Por su parte el afloramiento #4 posee una dirección N85E que buza 55° hacia el norte.

Las estructuras sinclinales que se observan en la sección de estudio se caracterizan por presentar cubiertos de sedimentos cuaternarios y/o lentes de lutitas asociados a la

Formación Pecaya, y que se pueden observar en contacto concordante con la Formación El Paraíso (ver figura 4.7).

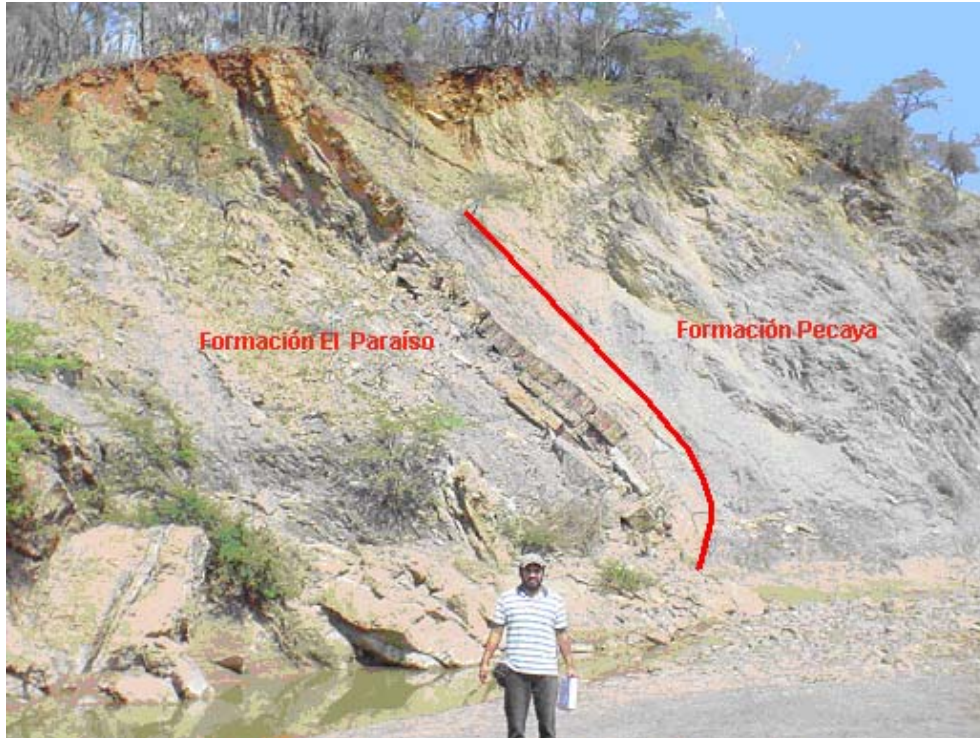


Figura 4.7. Contacto concordante entre las formaciones Pecaya y El Paraíso. Rumbo E-O.

Las areniscas observadas en los diferentes afloramientos presentan alto grado de diaclasamiento, observándose en algunos casos plegadas y hasta falladas. Los pliegues formados por las areniscas antes mencionadas son considerados pliegues parásitos que forman parte de las grandes estructuras anticlinales que componen a la Formación El Paraíso.

El conjunto de pliegues parásitos posee una orientación promedio en su plano axial de N80E. Dichos pliegues se encuentran asociados a fallas inversas, y en algunos casos forman frentes de cabalgamientos (ver figura 4.8).





Figura 4.8. Pliegues asociados a fallas inversas y frentes de cabalgamientos. Rumbo S70W.

## ANÁLISIS DE FACIES

### Generalidades

La facies se refiere a un cuerpo de roca caracterizado por una particularidad litológica, estructuras sedimentarias y contenido biológico que denotan un aspecto diferente del cuerpo de roca infrayacente, suprayacente o del que se encuentra lateralmente equivalente (Miall, 1990).

El significado de la palabra facies ha sido de gran controversia en los estudios geológicos modernos, como en el área de la petrología metamórfica. Hoy en día esta definición se utiliza tanto en sentido descriptivo como interpretativo, y la palabra en si misma es tanto singular como plural (Miall, 1990).

Las facies en sentido descriptivo incluyen litofacies y biofacies, y ambas son usadas para referir determinadas características de un cuerpo de roca sedimentaria que puede ser interpretado en términos de procesos depositacionales o biológicos. Una litofacies individual es una unidad de roca definida en las bases de sus semejanzas litológicas, tamaño de grano, características de la estratificación y estructuras sedimentarias. Las biofacies se definen en las bases de los componentes fósiles, incluyendo cuerpos fósiles o trazas fósiles (Miall, 1990).

La definición de los diferentes tipos de litofacies que se encuentran en esta sección de estudio se realizó en base al tamaño del grano, características visuales de textura y fabrica de la variedad de litotipos encontrados, así como de la presencia de estructuras sedimentarias. Estas características son distintivas y propias de rocas con mayor influencia terrígena, siendo nuestro caso este particular, y por esa razón serán definidas solo litofacies en este trabajo.

### **Nomenclatura de litofacies**

La nomenclatura que se usa en la definición de litofacies de este trabajo, se fundamenta en utilizar un sistema de siglas de fácil manejo y aprendizaje, el cual se basa en tomar primero la(s) letra(s) inicial(es) de cada tipo de roca y colocarla(s) en mayúscula, con la intención de identificar a la misma; luego asignarle un valor numérico (1,2,3,...) para el tamaño de grano predominante en la roca que se clasifica, en el caso en el que la mismas sean de composición terrígena o clástica, con la intención de establecer un código alfanumérico que combine a la roca que se quiere clasificar con el tamaño de grano que la caracteriza.

Ya definidos estos dos primeros parámetros, se asignará una segunda letra en minúscula para establecer la estructura sedimentaria predominante en la roca.

Ya establecida una secuencia alfanumérica que denotará el tipo de roca, tamaño del grano, y el tipo de estructura sedimentaria presente, se agregará otra connotación con una letra minúscula y cursiva que sirve para establecer otras características importantes como restos fósiles, marcas de conchas y moldes, etc.

Este método de clasificación se utilizará con la intención de mantener una homogeneidad, en cuanto a las facies que se encuentran en el centro de la cuenca con la finalidad de establecer códigos o parámetros de agrupación y distinción de facies en esta zona de estudio, para así crear un estándar de descripción de litotipos para trabajos futuros.

Ya teniendo establecido el sistema de clasificación y definición de litofacies para las diferentes rocas que se encuentran en esta región de la cuenca de Falcón, se presenta el siguiente sistema de abreviación:

1.- Para los tipos de rocas sedimentarias:

**CO:** conglomerados (grava y guijarros soportados por matriz).

**A:** areniscas (líticas y carbonáticas).

**L:** lutitas y limolita.

**C:** carbones y lutitas o limolita carbonosas.

**CA:** carbonatos.

**H:** intercalación de láminas y/o capas delgadas de areniscas con láminas de lutitas "*heterolitas*".

2.- Para diferenciar los tamaños de grano correspondiente a las lutitas y limonitas, como para las areniscas se utilizó la siguiente clasificación:

Para la lutitas y limolitas:

**1:** Lutita

**2:** Limolita

Para las areniscas:

**3:** de muy fino a fino

**4:** de fino a medio

**5:** de medio a grueso

Para los conglomerados:

**6:** gránulo

**7:** guijarros

**8:** peña

**9:** peñones

3.- Para indicar el tipo de estructura sedimentaria presente en la roca, si esta existe en la misma:

**p:** laminación y/o estratificación paralela

**c:** laminación y/o estratificación cruzada planar

**h:** laminación y/o estratificación *hummocky*

**j:** laminación y/o estratificación festoneada

**e:** laminación y/o estratificación espina de pescado

**r:** rizaduras

4.- Para indicar otras características:

**m:** moldes de fósiles y conchas.

**f:** fósiles y restos fósiles.

### **Definición de litofacies en la sección de estudio**

En base al conjunto de características de las diferentes unidades sedimentarias que componen esta sección de estudio, se realiza la siguiente división de litofacies tomando en cuenta los atributos específicos que distinguen a un conjunto de rocas de otras, siendo esta división la siguiente:

#### **Litofacies de areniscas de grano fino con laminación paralela (A3p)**

Areniscas de grano muy fino bien escogidas, de color negro que meteorizan a tonos gris oscuro, pardo, marrón, rojos, naranjas y violáceos (ver figura 4.9). Los espesores de estas varían entre 1 y 10 centímetros. Generalmente se encuentran en la base y en el tope de la secuencia.



Figura 4.9. Arenisca de grano fino y laminación paralela.

La estructura sedimentaria característica de esta litofacies es la laminación paralela. En ocasiones pueden observarse pequeñas vetas de cuarzo, jarosita, niveles de

oxidación, concreciones que pueden estar oxidadas y nódulos de óxidos. El diámetro de los nódulos de óxido varía entre los 1 y 5 centímetros.

### **Litofacies de areniscas de grano fino con moldes de conchas (A3m)**

Areniscas de grano muy fino que presentan buen escogimiento. Los colores frescos son gris oscuro y negro y meteorizan a gris claro. Los espesores de estas varían entre 30 y 70 centímetros y se encuentran ubicadas en el tope de la secuencia en estudio.

Esta facies se presenta de forma muy compacta y es bastante dura, se observan pequeñas vetas de calcita, de espesores milimétricos entre los planos de diaclasa. En el tope de las capas de esta litofacies se observa la presencia de moldes de conchas y fósiles (ver figura 4.10).



Figura 4.10. Arenisca de grano fino con moldes de concha.



### **Litofacies de areniscas de grano fino con rizaduras (A3r)**

Son areniscas de grano muy fino a fino bien escogidas, muy compactas y duras. El color fresco varia de gris claro a gris oscuro, y en ocasiones son blanquecinas, meteorizando a colores grises oscuros, naranjas, rojizos y marrón. Los espesores que presentan estas facies varían entre los 10 centímetros y los 3.5 metros, siendo las más competentes las que presentan un color blanquecino. Esta litofacies se ubica en la parte media de la secuencia en estudio.

Las estructuras sedimentarias son de origen físico, predominando las rizaduras (ver figura 4.11), que alcanzan dimensiones de hasta 2 centímetros de altura y 1.5 metros de longitud. En menor proporción se observan huellas de carga, laminación paralela, estratificación cruzada planar.

En algunas de las rocas que pertenecen a esta litofacies se pueden encontrar niveles de oxidación, concreciones oxidadas y no oxidadas y nódulos de óxidos que varían entre los 2 y 10 centímetros de diámetro. En repetidas ocasiones se vieron vetas de cuarzo entre los planos de fractura y diaclasamiento, yeso y jarosita.



Figura 4.11. Arenisca de grano fino con rizaduras en el tope.

**Litofacies de areniscas grano fino y estratificación cruzada planar (A3c)**

Areniscas de grano muy fino a fino, bien escogidas y muy compactas. Presentan un color fresco que varía de gris claro a oscuro y en ocasiones colores negros y blanquecinos, meteorizando a tonalidades grises oscuros, marrones, rojizos y naranjas. Los espesores de estas capas varían entre los 5 y 20 centímetros, encontrándose en las capas de mayor grosor en la sección media y hacia el tope.

La estructura sedimentaria que caracteriza a esta litofacies es la estratificación cruzada planar, y en algunos casos se observan rizaduras en aquellas capas que presentan un mayor espesor.

Presentan restos de jarosita, niveles de oxidación, y en algunos casos pequeñas vetas de cuarzo entre los planos de fractura. Esta facies presenta gran cantidad de granos de cuarzo, siendo este el mineral apreciable a simple vista y predominante en estas. Esta litofacies, al igual que las descritas anteriormente, presenta nódulos de óxidos de diferentes diámetros, concreciones.

**Litofacies de areniscas de grano fino con fósiles (A3f)**

Areniscas de grano muy fino, bien escogidas, con restos de conchas. El color fresco es pardo a marrón oscuro, y meteoriza a tonos grisáceos. El espesor de esta capa es de 40 centímetros.

Se pudieron apreciar restos de conchas como bivalvos, turritelas, algunas bien preservadas (ver figura 4.12), vetas de calcita entre los planos de fractura. Es bastante compacta, pero no presenta una competencia extrema. Esta litofacies se encuentra a pocos metros del tope de la secuencia.





Figura 4.12. Arenisca de grano fino con restos de fósiles.

### **Litofacies de lutitas negras laminadas y masivas (L1)**

Estas son secuencias de lutitas laminadas o masivas con espesores que varían desde unos pocos centímetros y que pueden alcanzar hasta 12 metros de grosor. Los colores frescos de estas lutitas varían desde un gris oscuro hasta el negro mate y los colores meteorizados varían desde tonos grises claros a oscuros, rojizos, anaranjados, marrones, amarillentos y violáceos (ver figura 4.13).



Figura 4.13. Lutitas negras laminadas y masivas

Las lutitas predominantes son del tipo laminadas (90% del total), las cuales se caracterizan por ser muy compactas y presentar una dureza considerable, mientras las masivas son más fisiles y se encuentran en menor proporción (10%) que las antes mencionadas.

Estas se pueden encontrar con restos de jarosita, vetas de cuarzo cortando la estratificación, niveles de oxidación, vetas de calcita, niveles yesíferos y hasta laminillas de carbón entre los paquetes de mayor espesor.

Las secuencias lutíticas por lo general presentan entre sus laminaciones gran cantidad de nódulos de óxidos, algunos muy grandes, entre los 2 y 15 centímetros de diámetro; también se pueden ver concreciones oxidadas y no oxidadas, y en varias zonas del área de estudio es común ver gran cantidad de lentes de areniscas del tipo **A3p**.

### Litofacies de carbón y lutitas carbonosas (C)

Los carbones presentan espesores que varían desde los 10 centímetros hasta los 1.4 metros, encontrándose las capas más espesas en la sección media y hacia el tope de la unidad, y las capas de menor tamaño en el tope de la misma. Estos carbones tienen un color negro muy brillante meteorizando a negro opaco, rojizo, marrón y amarillento (ver figura 4.14).

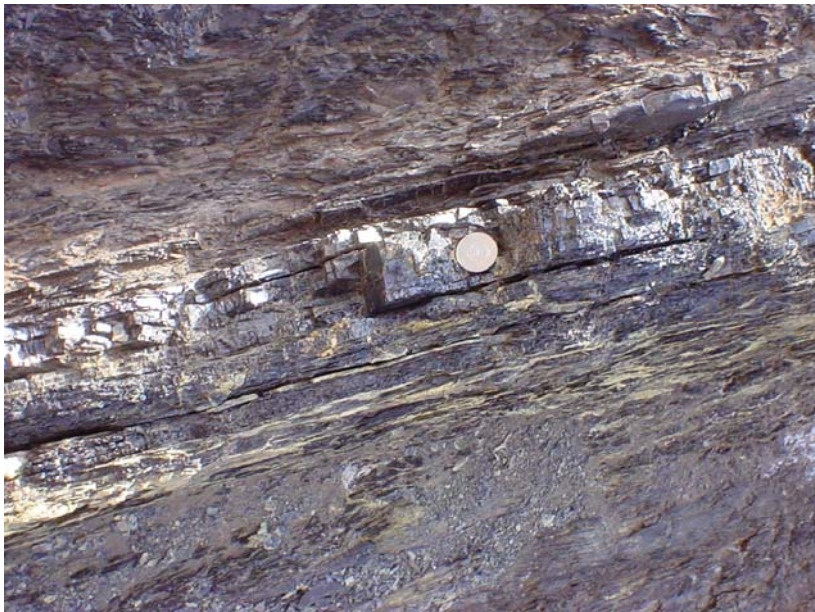


Figura 4.14. Capas de carbón con restos de jarosita.

Esta litofacies se le pueden apreciar en ocasiones niveles de óxidos, y presentan gran cantidad de jarosita. Estas vienen a representar un pequeño porcentaje (4.5%) del total de litotipos que componen a la sección de estudio.

Las lutitas carbonosas muestran espesores entre los 10 a 40 centímetros, y están presentes en su mayoría en la base y parte media de la sección de estudio (ver figura 4.15). Los colores frescos son negro mate y grises muy oscuros, meteorizando a tonalidades grises claros, rojizos, violáceos, amarillentos y marrones. Presentan nódulos de óxidos entre los 1 y 5 centímetros de diámetro, algunas concreciones,



laminas de yeso, y en la mayoría de las veces, gran cantidad de jarosita de colores amarillentos y mostaza.



Figura 4.15. Lutita carbonosa con restos de jarosita.

### **Litofacies de heterolitas (H)**

Litofacies caracterizada por la alternancia de capas de lutita y areniscas con espesores entre 2 y 4 centímetros. Presentan colores fresco negro a gris oscuro y se encuentra meteorizando a tonos que varían entre el gris oscuro y el gris claro (ver figura 4.16).

La única estructura sedimentaria que se puede apreciar es la laminación paralela muy fina. Se pueden ver niveles de oxidación, concreciones y nódulos de óxidos entre las areniscas que varían entre los 1 y 2 centímetros de diámetro. Esta facies se observa solo en la parte basal de la sección, y posee un espesor de 2.10 metros aproximadamente.



Figura 4.16. Heterolitas.

## ASOCIACIONES DE LITOFACIES

### Generalidades

Este concepto fue definido por Potter (1967) como "una agrupación de atributos sedimentarios que se asocian, incluyendo la geometría (espesores y extensión areal), continuidad y secuencia de unidades litológicas, tipos de rocas, estructuras sedimentarias y fauna (tipos y abundancia)" (Miall, 1990).

Miall (1990) citado por Bermúdez *et al.* (2003) indica que cada litofacies por separado puede representar un evento depositacional individual, y estas pueden ser agrupadas en asociaciones de litofacies que son la base para definir modelos de facies, que tienden a ser comúnmente cíclicos.

### **Ambientes y subambientes sedimentarios**

La mayor parte de la Formación El Paraíso es considerada por diferentes autores de tipo regresivo, en donde la línea de costa avanzó desde el suroeste de la cuenca de Falcón hacia el norte y noreste. Los sedimentos fueron transportados por varios ríos, que progresivamente construyeron una amplia llanura deltaica. Los carbones que se encuentran en esta formación representan el límite oriental de dicha llanura. El oleaje, y las corrientes litorales, retrabajaron los clásticos gruesos, y los extendieron por grandes distancias a lo largo de la costa (Wheeler, 1963).

Las llanuras deltaicas consisten principalmente de material arcilloso, rico en materia orgánica de las marismas y diques naturales; sin embargo la actividad fluvial permite que se formen cuerpos arenosos, tales como abanicos de rotura, barras de meandros y canales abandonados (Creole Petroleum Corporation, 1976 citado por Bermudez *et al.* 2003). Además del conjunto de subambientes nombrados anteriormente, también se incluyen una extensa variedad de depósitos marinos costeros a salobres que pueden ser pantanos, llanuras de marea, bahías y lagunas (Walker, 1992).

#### **Asociación de litofacies # 1 (AF1): *Lagunal***

Esta asociación posee un espesor aproximado de 326.98 metros y representa un 43.89% de la sección de estudio, principalmente se observa hacia la base y es menos frecuente en la zona media. Se encuentra constituido por las litofacies **A3p**, **L1** y **H** (ver figura 4.17 y anexo 3). Esta es una secuencia extremadamente rítmica, solo observándose la presencia de un pequeño nivel heterolítico casi en el tope de la Unidad Litológica UL1, que rompe con la interdigitación observada este nivel, para después continuar con un ritmo casi constante.

El tamaño del grano característico de esta asociación es de tipo muy fino, presentándose los contactos entre facies de forma abrupta. La estructura sedimentaria

de las areniscas que domina esta sección es la laminación de tipo paralela. Tomando en cuenta las características texturales de las rocas presentes, la estructura física que se observa en el acomodo interno de las areniscas y los contactos litológicos se interpreta un ambiente con condiciones de energía extremadamente bajas con pequeñas variaciones en el nivel de sedimentación, siendo estas casi imperceptibles.

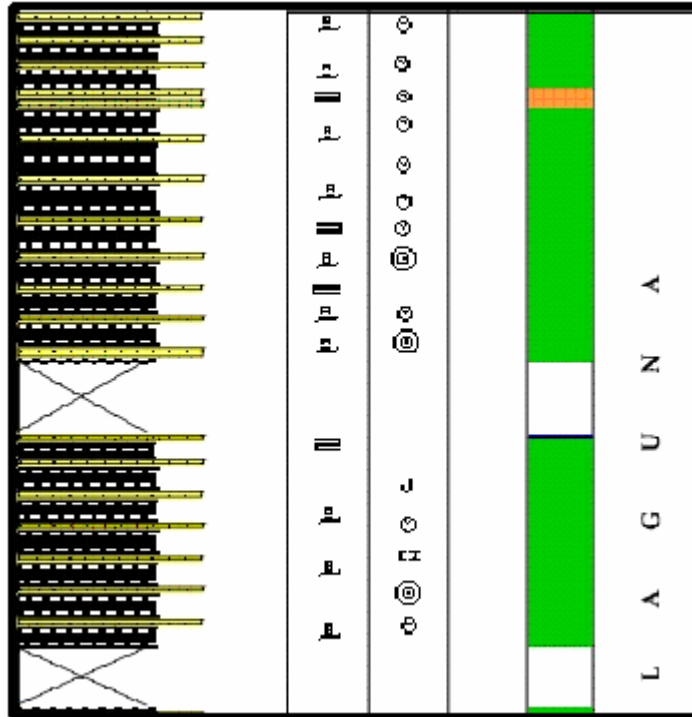


Figura 4.17. Extracto de la columna estratigráfica anexa que muestra una secuencia rítmica constituido por las litofácies **A3p**, **L1** y **H**

Las características mencionadas anteriormente son típicas de un ambiente de laguna. Los ambientes lagunales se sitúan en zonas costeras, y se encuentran relacionados con barras de playa, estuarios y marismas. Estos ambientes se caracterizan por considerarse cuerpos marginales semiencerrados de agua dulce, en el cual los porcentajes de salinidad son controlados por la descarga fluvial que se diluye en estas masas de agua (Fairbridge, 1980).

Las lagunas situadas en ambientes costeros se pueden clasificar según el evento geológico al cual estén ligadas. Por lo tanto, existen lagunas influenciadas por procesos transgresivos y las influenciadas por procesos regresivos o progradantes.

Aquellas lagunas que se encuentran influenciadas por eventos transgresivos se caracterizan por estar íntimamente ligadas a las barras de playa que les sirven en algunos casos de resguardo contra la influencia marina, pero en otras ocasiones estas son erosionadas por la acción de las mareas y el oleaje formándose accesos marinos directos a las lagunas, recibiendo aporte sedimentario de origen marino marginal y litoral (Davis, 1985).

Los sedimentos característicos de estos ambientes se encuentran representados por arcillas y lodos ricos en materia orgánica en el centro de la cuenca, dichos sedimentos pueden provenir de los ríos o de las marismas que separan a las lagunas de las montañas. De esta manera se pueden transportar sedimentos continentales, arenas, ostras y otros microorganismos típicos de las zonas costeras que se ubican en las partes más cercanas a las barras de playa (Davis, 1985).

Los sedimentos antes mencionados pueden entrar a las lagunas cuando las corrientes marinas invaden las masas de agua y el contenido orgánico, que en su mayoría son plantas que se ubican en las zonas marginales de las lagunas, son transportados a ellas por los ríos (Davis, 1985).

La sedimentación de estos materiales se realiza bajo condiciones de muy baja energía en el centro de la cuenca, el cual se caracteriza por ser de granulometría muy fina. En el caso de los márgenes o límites, donde los ríos inciden en las lagunas, y más específicamente hacia la zona litoral, donde la laguna se encuentra limitada y en contacto con la barra de playa, en la mayoría de los casos el nivel de energía es mayor, quizás dominado por mareas, y en estos lugares se pueden encontrar estratificación cruzada planar y marcas de rizaduras (Mc. Cubbin D.G., 1982).



Las lagunas que se encuentran influenciadas por eventos regresivos o de progradación, se caracterizan por estar relacionadas con las marismas y pantanos que las separan de las zonas montañosas, costas con barras de playa, canales de tormenta, dunas playeras, abanicos de mareas e inclusive marismas salobres.

Estas lagunas en su mayoría son alimentadas solamente por la acción de los ríos que transportan sedimentos de origen continental, junto con restos de materia orgánica. Por lo general este tipo de lagunas se crean y se confinan sin la acción de las aguas, fauna ni sedimentos marinos.

La presencia de areniscas litorales o playeras en las lagunas pueden ser producto de la acción de los vientos en las dunas y playas, transportando el material sedimentario re TRABAJADO a los bordes de las lagunas o a sus partes centrales, donde luego de ser depositado se litifica bajo niveles de energía casi inertes.

Un ejemplo citado por Mc. Cubbin D.G. (1982) sobre estos sistemas es el de la Formación Cliff House (Arenisca de La Ventana), al noroeste de Nuevo México en donde el intervalo superior de una unidad de areniscas que se interpreta como un depósito de isla de barreras es remplazado lateralmente al suroeste por sedimentos carbonáceos de grano fino los cuales se creen de ambiente lagunal (ver figura 4.18). Siguiendo con este mismo ejemplo se tiene que por lo general estas secuencias lagunales consisten de interestratificaciones de areniscas, lutitas laminadas con restos de plantas, limolitas, facies ricas en materia orgánica, y rocas de carbón, en donde usualmente estos depósitos de carbón y turba son muy delgados y probablemente sean plantas transportadas, formándose en los márgenes de las lagunas (ver figura 4.19). Por lo general los microorganismos que se encuentran en estos ambientes son foraminíferos arenáceos.

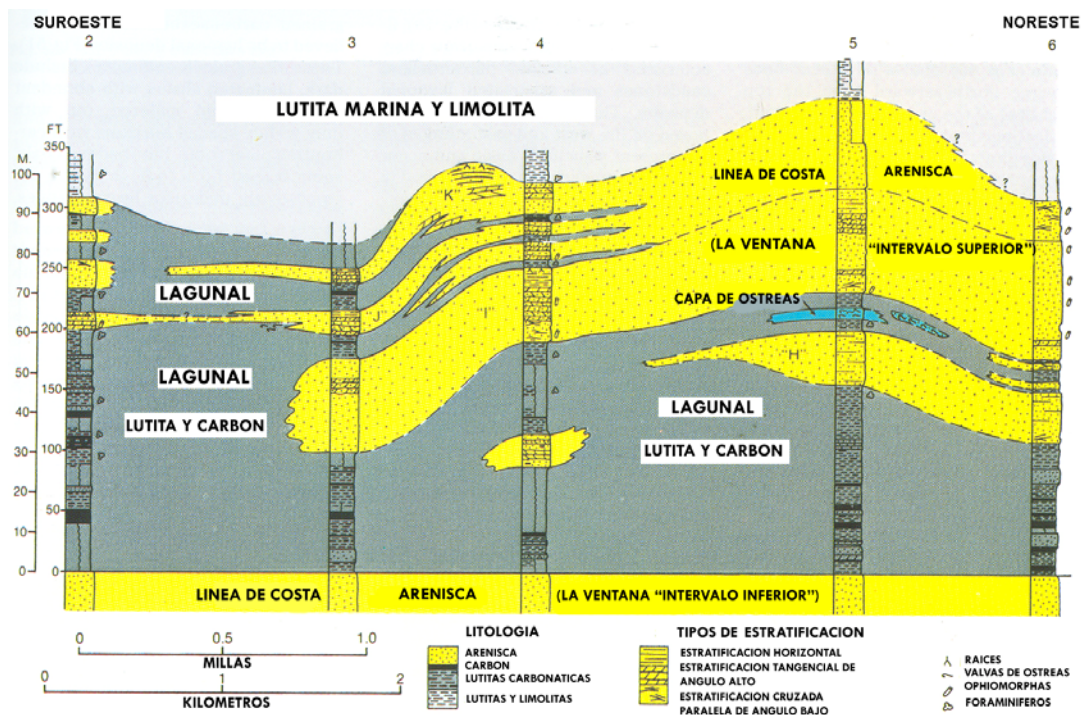


Figura 4.18. Sección transversal estratigráfica del intervalo superior de La Ventana Tongue en Hogback Mountain, al noroeste de Nuevo México. Tomado y modificado de Mc. Cubbin D.G. (1982).

La estructura sedimentaria más frecuente en estos depósitos pantanosos es la laminación paralela presente en las areniscas que se encuentran ubicadas en el centro de la laguna, donde el nivel de energía es casi nulo. Además, se observa laminación cruzada planar de muy bajo ángulo para las facies arenosas que se forman en los márgenes de la cuenca de las lagunas, donde influye la acción de las corrientes de los ríos que aportan los sedimentos.

Tomando en cuenta las características más importantes que presentan los ambientes lagunales, y relacionando esos parámetros descriptivos con la asociación de facies descrita anteriormente, se puede interpretar que la sección de la unidad de estudio analizada corresponde a un ambiente de laguna, que se forman bajo los eventos regresivos o de progradación, bajo condiciones mínimas de sedimentación (estructuras sedimentarias y niveles de energía) y/o contenido orgánico presente.

Además, la presencia de algunas de especies de foraminíferos arenáceos reportados por Díaz de Gamero (1977), es característica de este tipo de ambiente.

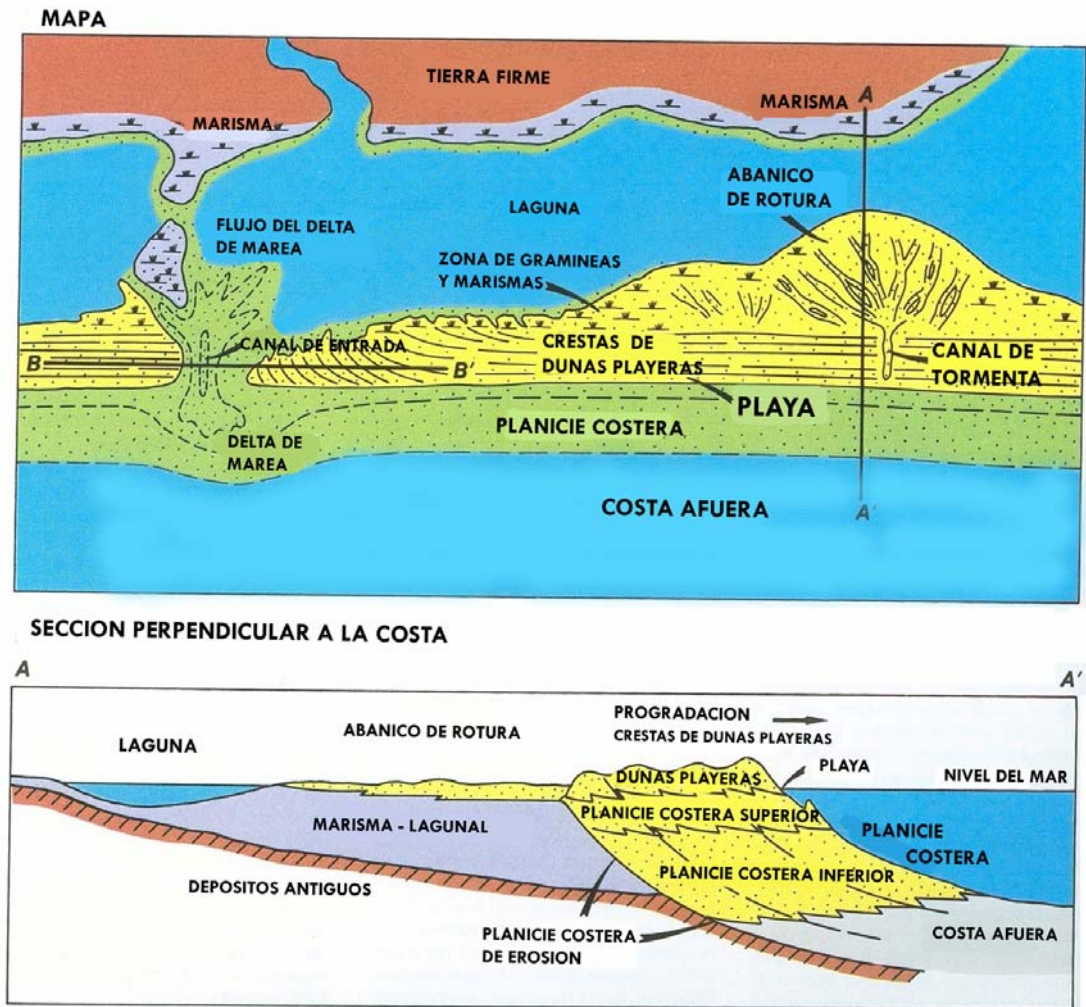


Figura 4.19. Mapa modelo de un ambiente lagunal. En la sección transversal A-A' se observa la relación vertical de facies para un evento progradante. Tomado y modificado de Mc. Cubbin D.G. (1982).

**Asociación de litofacies # 2 (AF2): *Marismas salobres costeras***

Esta asociación posee un espesor de 417.97 metros aproximadamente, lo que representa un 56.02% del total de la sección de estudio que se expone en este trabajo. Se encuentra ubicada desde la parte media, ocupando una gran fracción de la misma y sigue hasta el tope de la sección de estudio.

Esta se divide en dos subasociaciones, la primera que va desde la parte basal de esta asociación hasta la parte media y está compuesta por el conjunto de litofacies **A3c**, **A3r**, **A3p**, **L1**, y **C**, representando un espesor de 387.5 metros. La segunda, se encuentra en el tope y está compuesta por el conjunto de litofacies **A3p**, **A3m**, **A3f**, **C** y **L1**, representa 77.5 metros de espesor (ver anexo 3).

Al observar la distribución de los diferentes tipos de litofacies a lo largo de la primera subasociación se observa que la base y la parte central de la secuencia se encuentra parcialmente dominada por una alternancia de rocas de tipo **A3c**, **A3r**, **A3p**, **L1** y **C** que se repiten sucesivamente.

El nivel de energía que imperó durante la depositación de la primera subasociación es un poco mayor al observado en el tope, donde se encuentra la segunda subasociación. El cambio de nivel de energía está evidenciado por las estructuras sedimentarias de las facies **A3c** y **A3r** (estratificación cruzada y rizaduras), así como también por el tamaño del grano que es de tipo fino.

Tomando en cuenta las características antes descritas para cada subasociación, se establece un posible ambiente de depositación de marisma. Por esta razón se citan las características más resaltantes de este tipo de ambiente, con la intención de cotejar los resultados con las características teóricas que aquí se presentan.

Las marismas se consideran hondonadas cenagosas que se encuentran por encima o al nivel del mar, y por lo general están cubiertas de aguas muy someras (Creole Petroleum Corporation, 1976, citado por Bermúdez *et al.*, 2003). Estas se encuentran íntimamente ligadas a ambientes costeros en donde las condiciones de energía que persisten son muy bajas, a veces hasta inertes (Davis, 1985).

Dependiendo de la acumulación de sedimentos, la sucesión de plantas y la expansión de las marismas estas se dividen en marismas bajas y marismas altas. Las marismas bajas son jóvenes, bajas en topografía y están relacionadas con los estuarios adyacentes o con las condiciones marino costeras. Generalmente se encuentran sumergidas bajo las aguas de los ríos y los prismas mareales. Así mismo, las marismas bajas protegen a las plantas en los sustratos los cuales poseen abundante agua intersticial, y en éstas prevalece mayor cantidad de lodos y sedimento finos que de arenas (Davis, 1985).

Las marismas altas son más viejas, ocupan posiciones topográficas altas y son influenciadas por condiciones terrestres. Estas marismas altas tienen períodos de exposición al aire que pueden llegar a ser mayores de los 10 días, entre inundación mareal y la repetición de este ciclo. Las marismas altas protegen a las plantas en favor de los sustratos secos tales como las arenas permeables (Davis, 1985) (ver figura 4.20).

La mayoría de las partículas naturales que entran a los sistemas costeros son materiales finos que se componen por agregados inorgánicos y materia orgánica. Los depósitos de marismas están asociados a sólidos (rocas, materia orgánica, etc.) y a sedimentos. La textura de muchos sedimentos de marismas bajas es poco diferenciable, mientras que para las marismas altas se puede notar la gradación sedimentaria y en algunos casos se pueden ver las diferencias entre sedimentos y regolitas o material suelto. Por otro lado, los sedimentos biogénicos más comunes en las marismas son las turbas que le dan origen a los carbones (Davis, 1985).

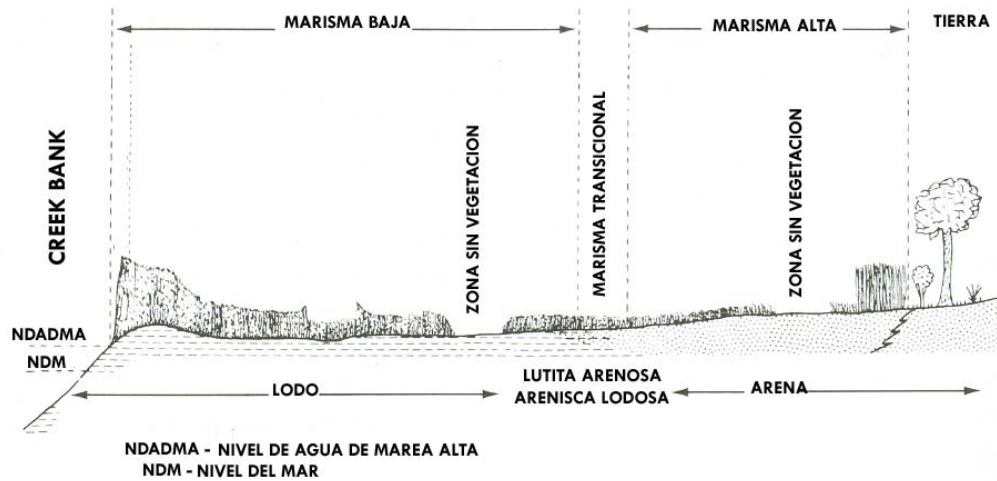


Figura 4.20. Diagrama de clasificación de marismas salobres. Tomado y modificado de Davis (1985).

La sedimentación de las facies que se pueden encontrar en estas marismas está influenciada por los rangos de poder que tienen los caudales de las mareas, ya sean de los ríos o de las corrientes litorales. Éstas, según sea el caso pueden estar afectadas por la vegetación y la topografía existente (Davis, 1985).

En el caso de las marismas bajas, la vegetación que se encuentra en los *creek banks* o bancos naturales, que no son más que el límite entre las marismas y las playas, afectan o impiden la entrada de las corrientes de agua de mar a las marismas, así como influyen los vientos y las descargas de agua dulce. Este mismo efecto influye sobre las marismas altas, esta es una de las razones por las cuales estas duran cierto tiempo emergidas y expuestas (Davis, 1985).

Davis (1985), indica que estas razones son las que influyen en la sedimentación y ordenamiento interno de los granos que componen a las diferentes facies de una marisma. Por lo general éstas presentan niveles de energía de depositación muy bajos, por lo cual la estructura sedimentaria clásica de estos ambientes es la laminación paralela. La laminación paralela es atribuida a mareas o corrientes que re trabajan materia orgánica y sedimentos que por lo general están en suspensión. Otra de las

estructuras que se pueden encontrar en estos ambientes son las rizaduras y marcas de arrastre, las cuales están íntimamente ligadas a los niveles de marea.

Al observar estas características, y la subdivisión que se le hace a este ambiente sedimentario se puede decir que el grupo ubicado hacia el tope y que está compuesto por las litofacies **A3m**, **A3f**, **A3p**, **L1** y **C** posee características de una marisma de tipo baja (ver figura 4.21), mientras que el grupo ubicado hacia la parte baja de este asociación y que se compone por las rocas de tipo **A3c**, **A3R**, **A3p**, **L1** y **C** presenta similitud con las marismas de tipo alta (ver figura 4.22).

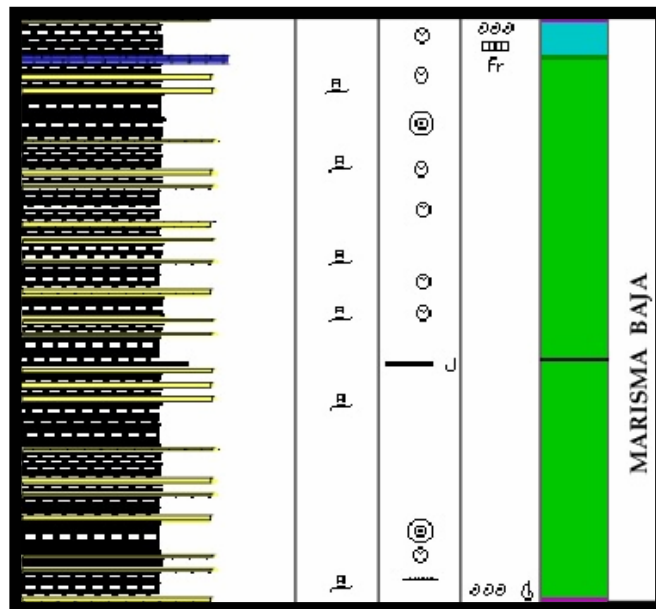


Figura 4.21. Extracto de la columna estratigráfica anexa que muestra una secuencia constituida por las litofacies **A3m**, **A3f**, **A3p**, **L1** y **C** características de un ambiente de marisma baja.



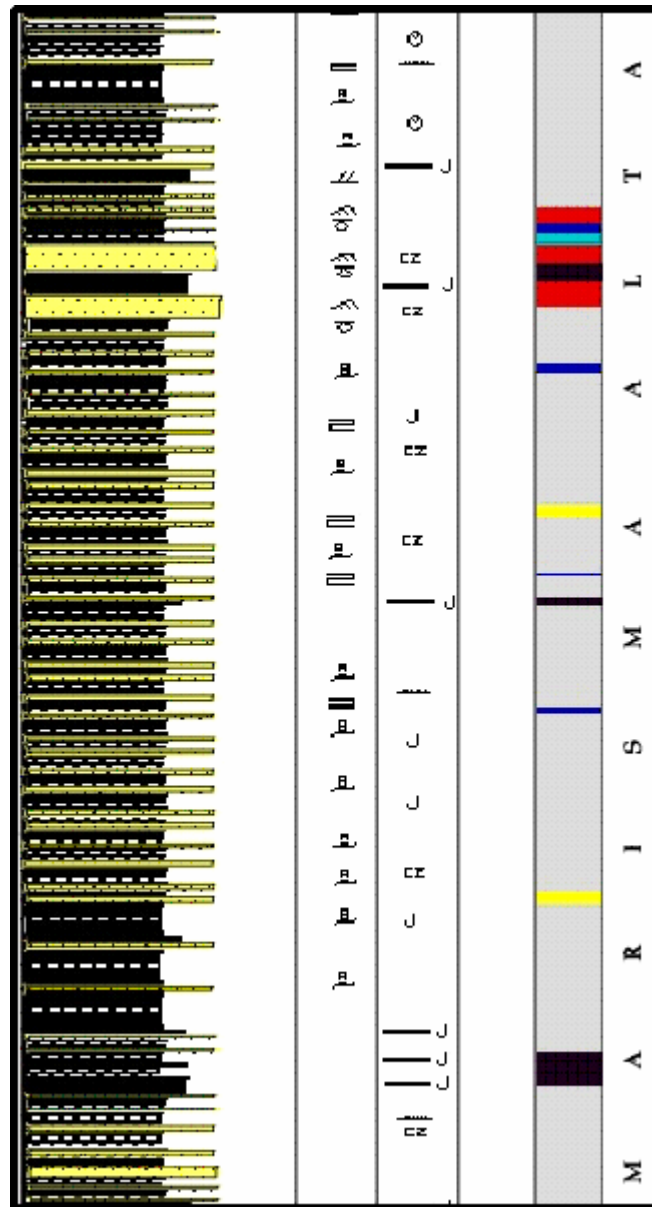


Figura 4.22. Extracto de la columna estratigráfica anexa que muestra una secuencia constituida por las litofacies A3c, A3R, A3p, L1 y C características de una ambiente de marisma alta.

### Interpretación General

Durante la realización de este estudio se trabajó solo con una secuencia estratigráfica, por lo cual hablar de ambientes específicos es bastante complejo. Es necesario realizar estudio en otras zonas para establecer relaciones laterales que permitan



desarrollar un modelo más confiable. Sin embargo, se realizó un modelo en base a los datos recolectados en la sección tipo de la parte superior de la Formación El Paraíso.

Diversos autores coinciden que la Formación El Paraíso es de tipo regresivo, y que progresivamente formó una amplia llanura deltaica. Tomando esta idea como punto de referencia y comparándola con los análisis hechos a la sección de estudio que se presenta en este trabajo, puede señalar que estamos localmente bajo condiciones más costeras que continentales.

La parte inferior de la sección en estudio se encuentra representada por un ambiente de tipo lagunal con influencia regresiva o progradante. Las areniscas y lentes de areniscas que aquí se encuentran indican un nivel de energía muy bajo, con la presencia de alto contenido de materia orgánica reflejada por las lutitas negras y las lutitas carbonosas.

La secuencia rítmica observada para la asociación de litofacies **AF1** refleja pequeños aumentos en los niveles de energía producto de aumentos del caudal de los ríos, denotados con la aparición de las capas y lentes de arenisca, mientras que el aporte de material orgánico producto del arrastre de restos de estos, o del crecimiento de vegetación en las cercanías de la laguna.

La zona en estudio se caracteriza por la poca presencia de organismos, lo cual puede venir dado por las condiciones de hábitat que presentaba el ecosistema en ese entonces. Estas condiciones pueden incluir características como el contenido de nutrientes en el sustrato, el nivel de pH y salinidad del medio, entre otros.

Esta secuencia lagunal definida por la asociación de litofacies **AF1** se encuentra en contacto abrupto con la sección que está definida por la asociación de litofacies **AF2**, suprayacente a la anterior. En las secciones interpretadas como un ambiente de marisma, y subdividida en dos intervalos, se observa una repetición sucesiva de

litofacies en la marisma de tipo alto. La presencia de dos capas de areniscas resaltan en toda la sección y se pueden interpretar como una posible sedimentación de areniscas transportadas por corrientes litorales que invadieron las partes marginales de la marisma, y que además presentan rizaduras bastante marcadas en el tope de las capas.

Este subambiente de marisma alto se caracteriza también por presentar gran cantidad de niveles de óxidos en sus estratos, lo cual puede ser el reflejo de la exposición a la cual fue sujeta esta sección en algunos momentos, ya que las masas de agua que la cubrían se retiraban de esta zona. Otra característica de esta área es la presencia de la mayor cantidad de capas de carbón de toda la sección, lo cual está íntimamente ligado con los sedimentos orgánicos que allí se depositaron.

La presencia de estructuras sedimentarias de tipo estratificación cruzada planar pueden marcar los cambios de flujo que ocurrían tanto con la entrada de corrientes mareales, como las descargas de agua dulce que contrarrestaban los niveles de salinidad.

Haciendo referencia a la sección superior de esta asociación, interpretada como una marisma baja, se puede decir que esta zona se caracteriza por la presencia de características de ambientes con niveles de energía muy bajos. Dicho nivel de energía es reflejado por la granulometría fina encontrada en la sección, como lo es la presencia de lutitas negras en gran cantidad, algunas capas y lentes de areniscas de grano muy fino con laminación paralela.

Las litofacies **A3f** y **A3m** ubicadas hacia el tope de la secuencia, pueden estar asociadas a invasiones de aguas marinas que sobrepasaron el *creek banks* que separa a las marismas de las playas, y para ese momento arrastró restos de conchas y/o fósiles que se depositaron en las partes más externas de la marisma donde el material es más arenoso, y por esa razón encontramos las conchas en esta secuencia.

Las dos litofacies mencionadas anteriormente marcan el inicio de una transición de ambiente continental a marino, que marcan el inicio de un periodo de transgresión que da lugar a la depositación de las lutitas de la Formación Pecaya de ambiente marino.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS QUÍMIOESTRATIGRÁFICO

#### ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

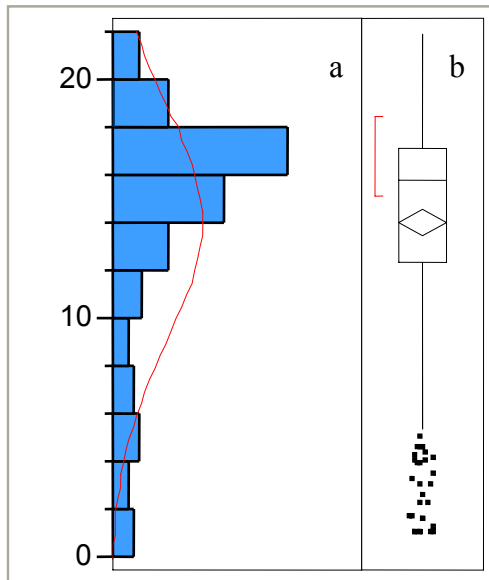
A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico de todos los datos. Posteriormente cada uno de éstos se analiza particularmente para poder establecer comparaciones entre los tipos de litologías identificadas en la sección estratigráfica estudiada.

Para realizar el análisis no se tomaron en cuenta las muestras correspondientes a los carbones, esto debido a que el número de muestras era muy pequeño para realizar un análisis que permitiera inferir sobre el comportamiento real de los datos. Por esta razón, solo se analizaron por separado los datos correspondientes a areniscas y lutitas.

#### **Histogramas de frecuencia y diagramas de caja químicos**

Los histogramas de frecuencia son gráficos que permiten estudiar la distribución de los datos. Por su parte, los diagramas de caja representan gráficamente medidas de la dispersión de los datos, la mediana, y la presencia de valores anómalos.

A continuación se presentan los histogramas de frecuencia y diagramas de caja para cada variable en la toda la secuencia estudiada, así como también para cada tipo de litología:

Cuadro 5.1. Estadística descriptiva para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Máximo (%)	21,903
Mínimo (%)	1,003
Media (%)	14,019
Mediana (%)	15,831
Desviación Estándar	4,994
W	0,840
Prob<W	0.000

Figura 5.1. a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

En la figura 5.1.a se observa el histograma de frecuencia del elemento  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para todos los datos, que incluyen todas las litologías presentes en la zona de estudio, se evidencia que la distribución de los valores no es normal, lo cual puede ser corroborado con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con un valor de 0.84 para el estadístico W, y una probabilidad menor a 0.01; además se observan valores atípicos bajos.

En el cuadro 5.1 se observa que la media es de 14.01% y una desviación estándar de 4.99. Es importante destacar que el valor de la mediana es superior al de la media, esto se debe a que la mayor frecuencia de las observaciones se ubica entre 16 y 18% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , el cual es superior al de la media (ver figura 5.1.b).

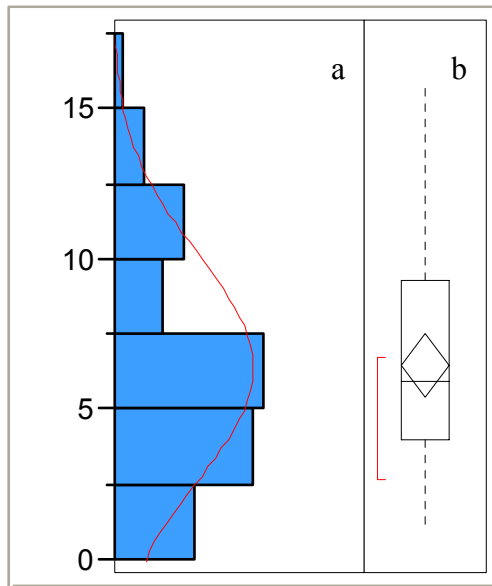


Figura 5.2.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en areniscas.

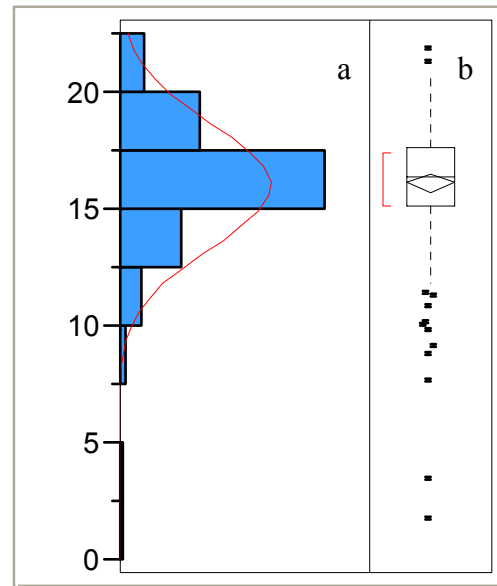


Figura 5.3.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en lutitas.

Cuadro 5.2. Estadística descriptiva para el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	15,904	21,903
Mínimo (%)	1,003	1,755
Media (%)	6,446	16,080
Mediana (%)	5,937	16,356
Desviación Estándar	3,752	2,686
W	0,939	0,917
Prob<W	0,014	0,000

Al analizar los valores de las areniscas (ver figuras 5.2.a y b y cuadro 5.2) se observa que presentan una distribución normal, con un valor  $W= 0.94$  y probabilidad de 0.014; para el caso de las lutitas, (ver figuras 5.3.a y b y cuadro 5.2) aún cuando el estadístico es mayor de 0.90, la probabilidad es menor a 0.01, lo que significa que los datos no se distribuyen normalmente, esto posiblemente debido a la presencia de valores atípicos.

Se observa que las areniscas poseen una media de 6.44%, en contraste con las lutitas, cuyo valor es de 16.07%. Cabe destacar que en este último caso las observaciones son

menos dispersas como se puede ver en el diagrama de caja, y en el valor de la desviación estándar. Para ambas litologías, la mediana se encuentra dentro del intervalo de confianza de la media.

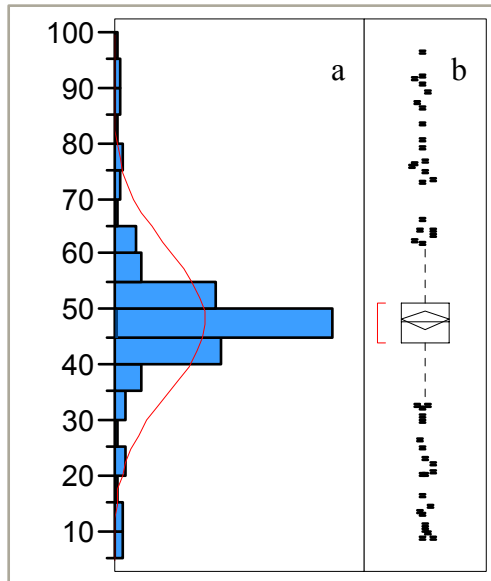


Figura 5.4.a. Histograma de frecuencia y b. Diagrama de caja para el SiO<sub>2</sub>.

Cuadro 5.3. Estadística descriptiva para el SiO<sub>2</sub>.

Máximo (%)	96,325
Mínimo (%)	8,507
Media (%)	47,966
Mediana (%)	47,671
Desviación Estándar	12,718
W	0,857
Prob<W	0,000

El histograma para el SiO<sub>2</sub>, (figura 5.4.a) y la estadística descriptiva (cuadro 5.3) muestran una distribución no normal con un valor de W de 0.85 y valores atípicos en ambos extremos, como se observa en el diagrama de caja. (ver figura 5.4.b)

Para este elemento mayoritario el valor de la media es 47.97%, muy cercano al valor de la mediana de 47.67%, lo cual indica una concentración de los valores hacia el 50% de las observaciones. El tamaño de la caja, así como el valor de la desviación estándar evidencia una baja dispersión de los datos.

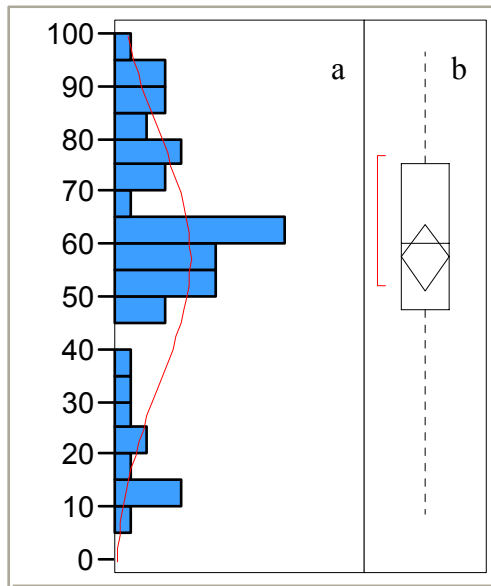


Figura 5.5.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el SiO<sub>2</sub> en areniscas.

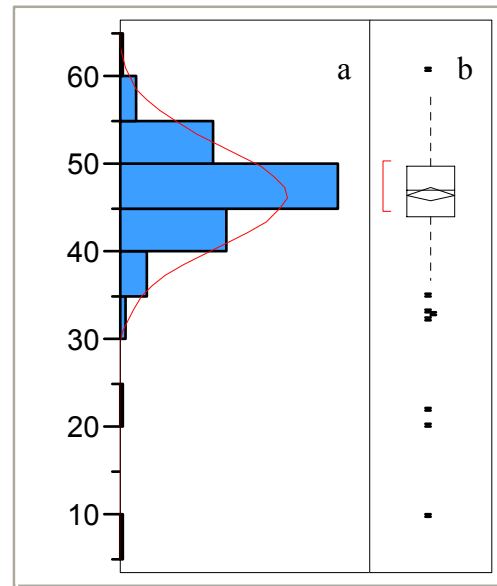


Figura 5.6.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el SiO<sub>2</sub> en lutitas.

Cuadro 5.4. Estadística descriptiva para el SiO<sub>2</sub> en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	96,325	60,890
Mínimo (%)	8,615	9,949
Media (%)	57,356	46,602
Mediana (%)	60,304	47,213
Desviación Estándar	23,363	5,726
W	0,927	0,891
Prob<W	0,003	0,000

En los gráficos por litología (figuras 5.5.a y 5.6.a) se observa que el valor de la media varía notablemente, para las areniscas es de 57.36%, mientras que para las lutitas es del 46.60%. Así mismo en el cuadro 4.4 se observa que el valor de la desviación estándar es diferente, para las areniscas se observa un valor alto de 23.36, y un valor muy bajo de 5.72 para las lutitas, lo cual hace que el diagrama de caja para las lutitas sea bastante angosto, con una frecuencia alta de valores entre 45 y 50% (figuras 5.5.b y 5.6.b).



Se nota un aumento importante del valor de W para las areniscas, no observándose valores atípicos, estas dos condiciones indican una mejor distribución de los datos sin llegar a ser normales. Para el caso de las lutitas el incremento de W fue menor, y se observan algunos valores atípicos.

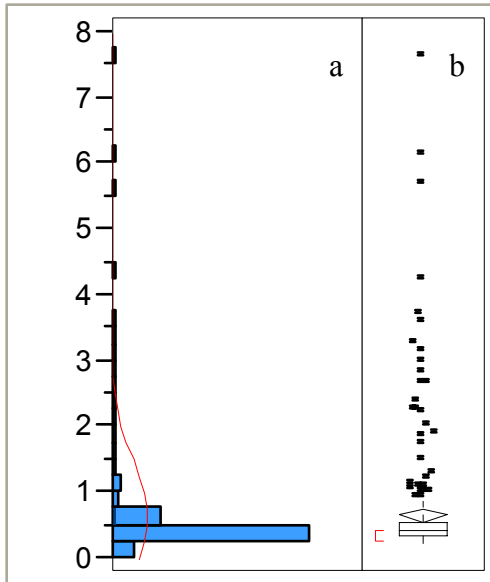


Figura 5.7.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el CaO.

Cuadro 5.5. Estadística descriptiva para el CaO.

Máximo (%)	7,664
Mínimo (%)	0,199
Media (%)	0,630
Mediana (%)	0,389
Desviación Estándar	0,854
W	0,445
Prob<W	0,000

En el caso del CaO se puede observar en las figuras 5.7.a y b y cuadro 5.5 un comportamiento asimétrico, muy lejos de una distribución normal, esto debido a la gran concentración de valores bajos, inferiores al 1% y valores atípicos de hasta 8%. Esta concentración también afecta el valor de la mediana, el cual es menor al valor de la media. La presencia de valores atípicos muy altos es una razón por la cual el valor de la desviación estándar es superior a la media.

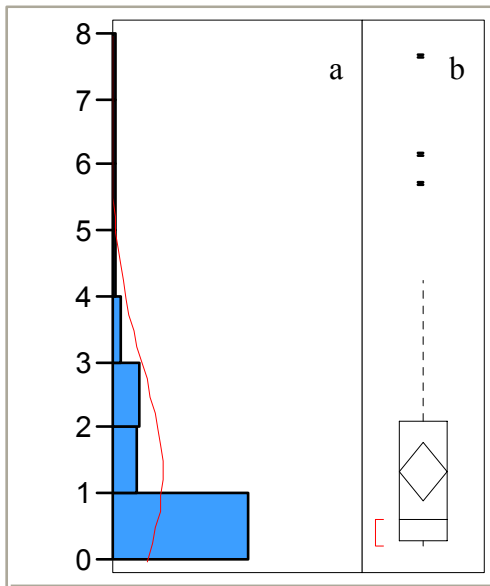


Figura 5.8.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el CaO en areniscas.

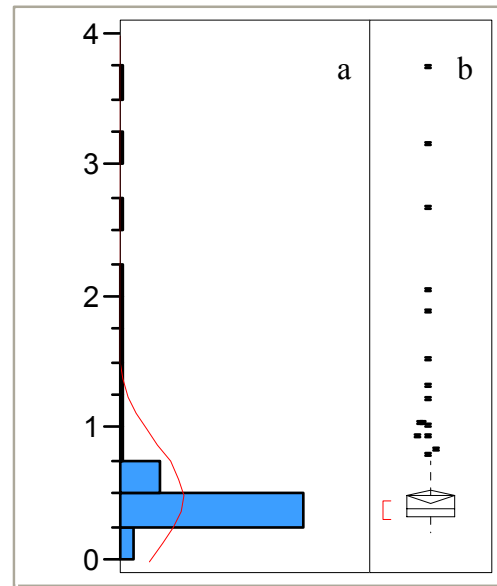


Figura 5.9.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el CaO en lutitas.

Cuadro 5.6. Estadística descriptiva para el CaO en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	7,664	3,743
Mínimo (%)	0,199	0,210
Media (%)	1,330	0,476
Mediana (%)	0,599	0,379
Desviación Estándar	1,650	0,394
W	0,701	0,479
Prob<W	0,000	0,000

Al realizar el análisis de las litologías, cuyos resultados se presentan en las figuras 5.8.a y 5.9.a, y cuadro 5.6, es importante señalar que para las areniscas el valor de la media es notablemente superior al de las lutitas. Así mismo, en las figuras 5.8.b y 5.9.b se puede ver como el tamaño del diagrama de caja es más grande en las areniscas, lo cual indica una mayor dispersión de valores.

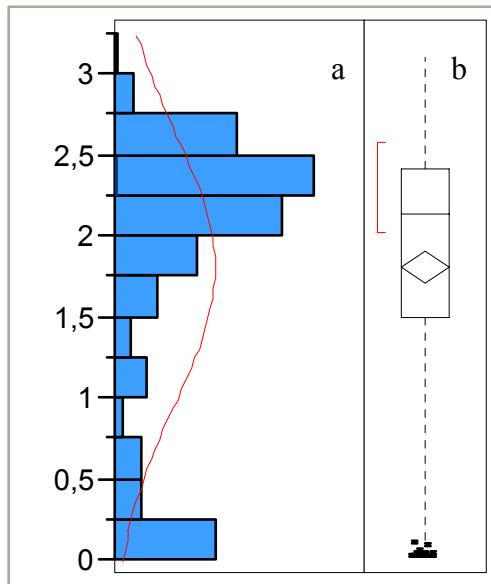


Figura 5.10.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $K_2O$ .

Cuadro 5.7. Estadística descriptiva para el  $K_2O$ .

Máximo (%)	3,095
Mínimo (%)	0,016
Media (%)	1,811
Mediana (%)	2,128
Desviación Estándar	0,843
W	0,814
Prob<W	0,000

Los histogramas de frecuencia correspondientes al potasio (figura 5.10.a), y el cuadro 5.7 muestran que la distribución de los valores no es normal, el valor de 0.81 del estadístico W de Shapiro-Wilk junto con la probabilidad menor a 0.01 así lo demuestran (figura 5.10.b). Para los datos obtenidos del potasio, es importante mencionar el hecho que el valor de la mediana es mayor al valor de la media, esto debido a que la mayor frecuencia de los valores se encuentra entre 2% y 2.75% de K.

Al observar los histogramas de cada litología (figuras 5.11 y 5.12) se observa que para ambos casos la distribución no es normal. Para las areniscas la gráfica es totalmente asimétrica, mientras que para las lutitas a pesar de que tiende a la simetría no llega a ser normal debido a la presencia de valores atípicos.

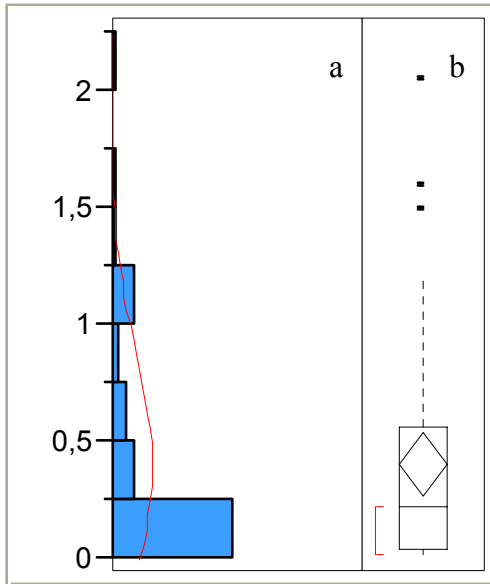


Figura 5.11.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $K_2O$  en areniscas.

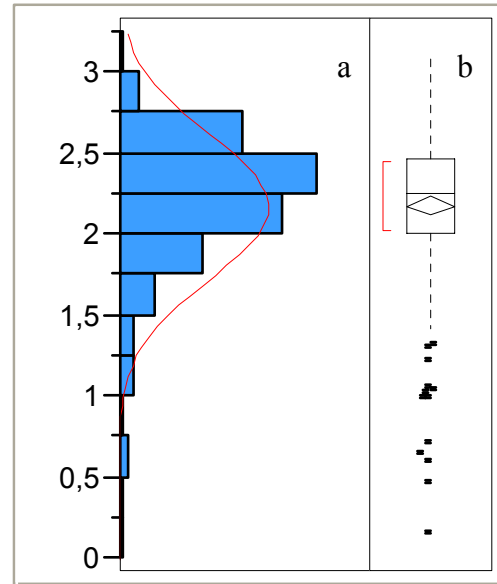


Figura 5.12.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $K_2O$  en lutitas.

Cuadro 5.8. Estadística descriptiva para el  $K_2O$  en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	2,055	3,095
Mínimo (%)	0,016	0,158
Media (%)	0,398	2,173
Mediana (%)	0,218	2,255
Desviación Estándar	0,482	0,447
W	0,774	0,895
Prob<W	0,000	0,000

Al observar los datos agrupados según la litología, (cuadro 5.8) se observa como la media de las lutitas (2.17%) es muy superior a la media de las areniscas (0.39%), esto producto de la presencia de minerales de arcillas en las lutitas, los cuales tienen mayor contenido de potasio que aquellos minerales presentes en las areniscas. En cuanto a la desviación estándar, se observa como para el gráfico en general tiene un valor relativamente alto con respecto a los gráficos de cada litología, ya que para cada litología los valores están agrupados de manera diferente.

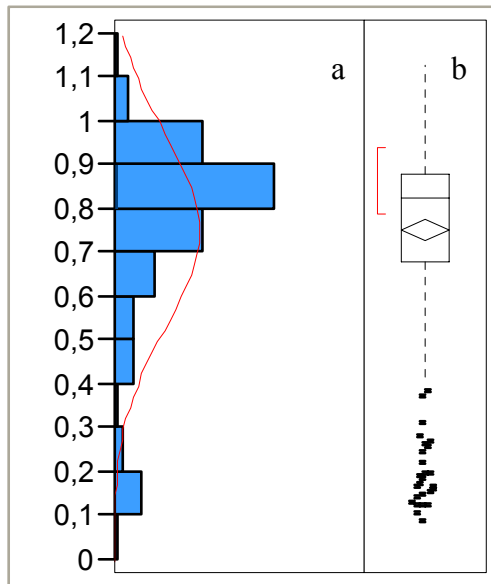


Figura 5.13. a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{TiO}_2$ .

Cuadro 5.9. Estadística descriptiva para el  $\text{TiO}_2$ .

Máximo (%)	1,128
Mínimo (%)	0,089
Media (%)	0,750
Mediana (%)	0,823
Desviación Estándar	0,218
W	0,822
Prob<W	0,000

Los resultados obtenidos para el  $\text{TiO}_2$  (figura 5.13 y cuadro 5.9) son similares a los del  $\text{K}_2\text{O}$ , donde se observa una distribución no normal, evidenciada por la asimetría de la gráfica, así como también por el valor de 0.82 del estadístico W de Shapiro-Wilk en combinación con una probabilidad menor a 0.01.

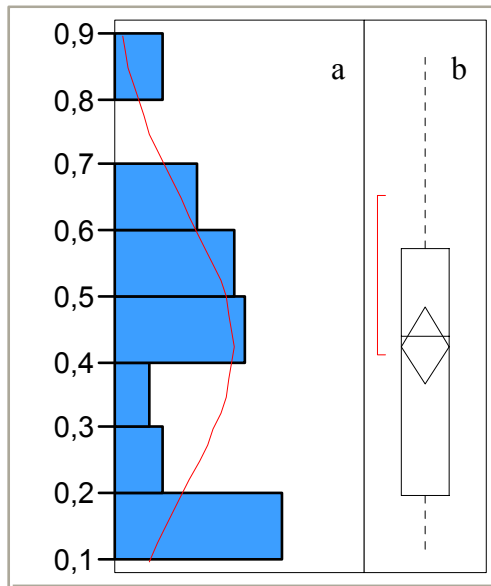


Figura 5.14.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{TiO}_2$  en areniscas.

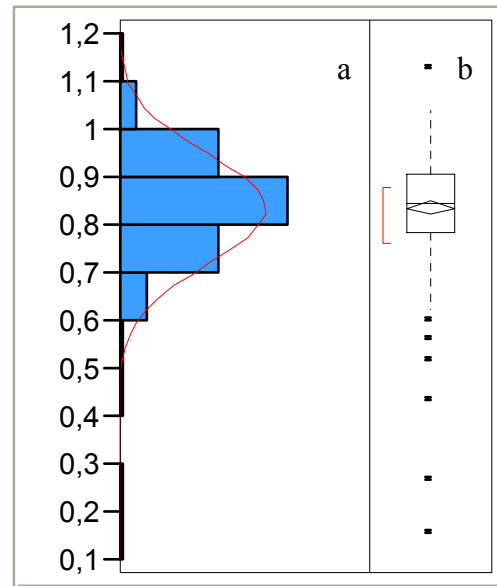


Figura 5.15.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{TiO}_2$  en lutitas.

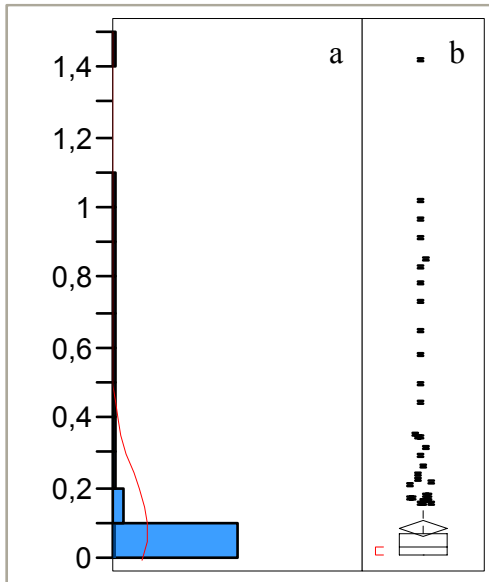
Cuadro 5.10. Estadística descriptiva para el  $\text{TiO}_2$  en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	0,865	1,128
Mínimo (%)	0,103	0,157
Media (%)	0,423	0,835
Mediana (%)	0,441	0,845
Desviación Estándar	0,210	0,114
W	0,935	0,914
Prob<W	0,009	0,000

Para cada grupo litológico la distribución tampoco es normal (ver figuras 5.14 y 5.15), en el caso de las areniscas se observa una gráfica totalmente asimétrica, mientras que para las lutitas se observa una buena simetría, sin embargo la presencia de valores atípicos muy bajos no permiten que la distribución de los datos sea normal.

Es importante destacar (cuadro 5.10) que el valor promedio de  $\text{TiO}_2$  para las lutitas es notablemente superior al observado para las areniscas. Además de esto, se puede ver

como para las lutitas el tamaño del diagrama de caja es mucho mayor al que presenta las areniscas, lo cual es indicativo de una mayor dispersión de valores para las lutitas.



Cuadro 5.11. Estadística descriptiva para el MnO.

Máximo (%)	1,423
Mínimo (%)	0,010
Media (%)	0,082
Mediana (%)	0,033
Desviación Estándar	0,170
W	0,446
Prob<W	0,000

Figura 5.16.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MnO.

En el histograma de frecuencia que refleja los datos obtenidos del MnO (figura 5.16), se observa como los datos se distribuyen de manera asimétrica, esto debido a que la mayor frecuencia de valores se encuentra entre 0 y 0.1%, con un rango de 0,01% a 1.42% resultando en un valor de W es bastante bajo, indicativo de distribución no normal de los datos (cuadro 5.11).

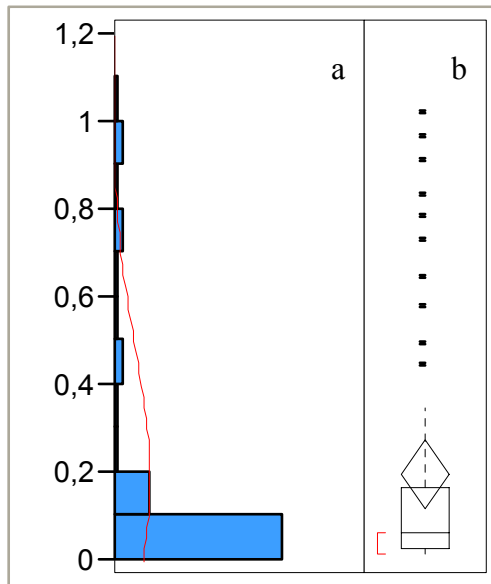


Figura 5.17.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MnO en areniscas.

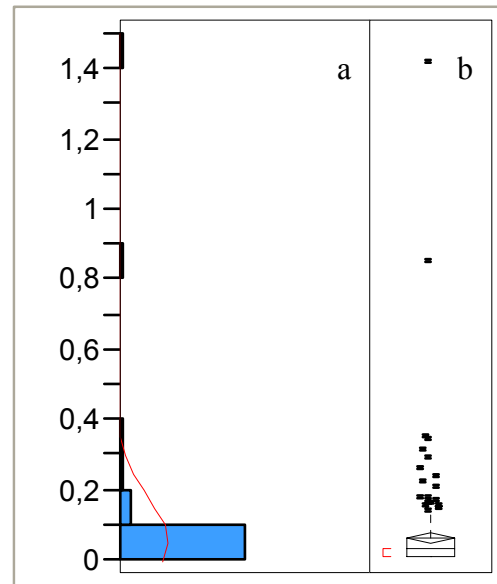


Figura 5.18.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MnO en lutitas.

Cuadro 5.12. Estadística descriptiva para el MnO en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	1,022	1,423
Mínimo (%)	0,010	0,010
Media (%)	0,192	0,059
Mediana (%)	0,059	0,030
Desviación Estándar	0,285	0,120
W	0,649	0,397
Prob<W	0,000	0,000

Para cada litología, (figuras 5.17 y 5.18) se mantiene el comportamiento asimétrico de la curva, producto de la concentración de los datos antes mencionada.

A pesar de la concentración de datos hacia una parte de la gráfica, es importante destacar que la desviación estándar es mayor a la media presente, tanto en la gráfica general como en las de cada grupo litológico, debido a los valores atípicos altos que generan una dispersión alta.



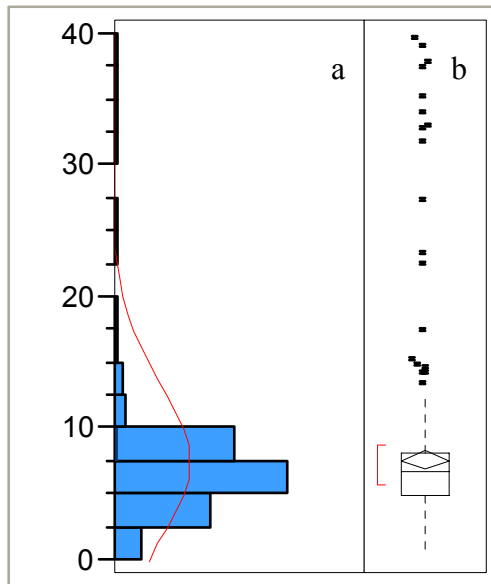


Figura 5.19. a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Cuadro 5.13. Estadística descriptiva para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Máximo (%)	39,755
Mínimo (%)	0,634
Media (%)	7,532
Mediana (%)	6,702
Desviación Estándar	6,006
W	0,605
Prob<W	0.000

La gráfica del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (figura 5.19) es similar a la gráfica del elemento anterior, en donde se observa una asimetría con valores concentrados entre 5% y 7.5%.

Vale la pena destacar en el cuadro 5.13 la desviación estándar, su valor de 6.0% se encuentra bastante cercano al de la media (7.53%) producto de la alta dispersión de los valores.

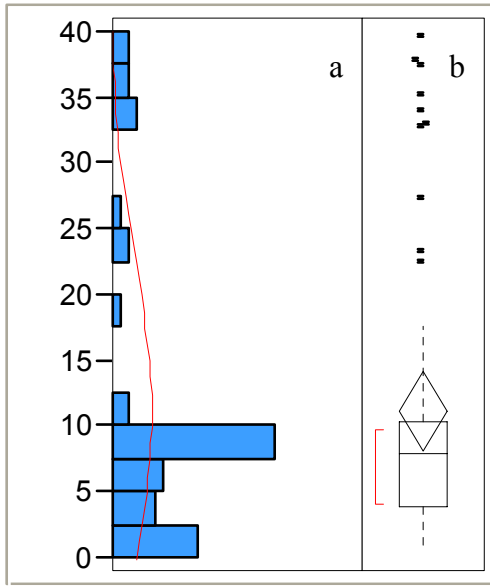


Figura 5.20.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en areniscas.

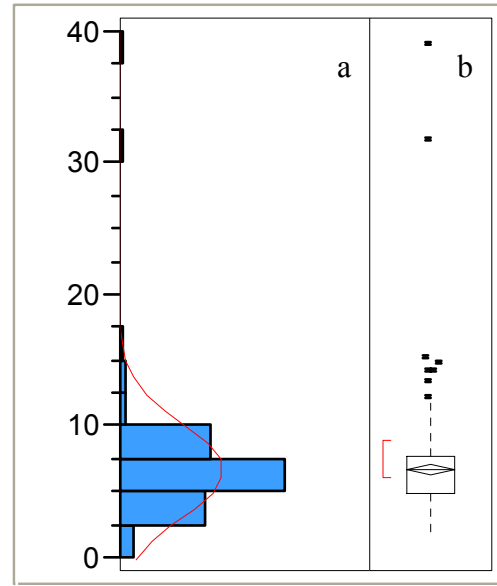


Figura 5.21.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en lutitas.

Cuadro 5.14. Estadística descriptiva para el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	39,755	39,045
Mínimo (%)	0,634	1,474
Media (%)	11,160	6,689
Mediana (%)	7,926	6,620
Desviación Estándar	11,130	3,588
W	0,752	0,676
Prob<W	0,000	0,000

Al realizar el análisis por litología, se observa como para las areniscas la dispersión es mucho mayor, el valor de la desviación estándar es similar al valor de la media, lo cual es indicativo de una alta dispersión. Para las lutitas la dispersión no es tan alta aunque existen valores atípicos (figuras 5.20 y 5.21).

El valor de la media de las areniscas (cuadro 5.14) es muy superior al que presentan las lutitas, esto debido a la mayor presencia de muestras con valores superiores al 20% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a lo largo de toda la secuencia en estudio.

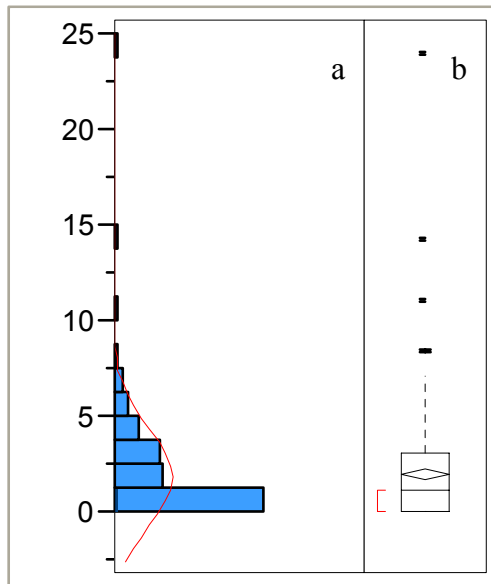


Figura 5.22.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MgO.

Cuadro 5.15. Estadística descriptiva para el MgO.

Máximo (%)	23,993
Mínimo (%)	0,042
Media (%)	1,927
Mediana (%)	1,179
Desviación Estándar	2,512
W	0,735
Prob<W	0.000

En el histograma del MgO (figuras 5.22.a y b) se observa que los datos se distribuyen de una manera asimétrica, donde la mayor frecuencia se ubica entre 0% y 1.25%. Esta mayor frecuencia se debe a que para el MgO existen muchos valores que se ubican en el límite de detección del equipo (0.0425%).

Los valores máximos de este elemento corresponden a muestras de carbón, por lo que no se aprecian en los gráficos correspondientes a areniscas y lutitas.

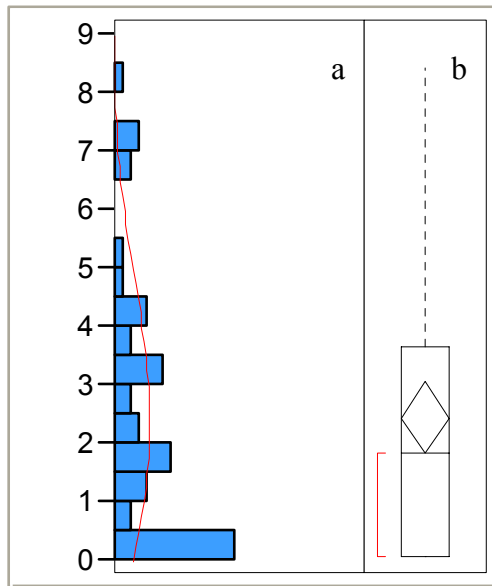


Figura 5.23.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MgO en areniscas.

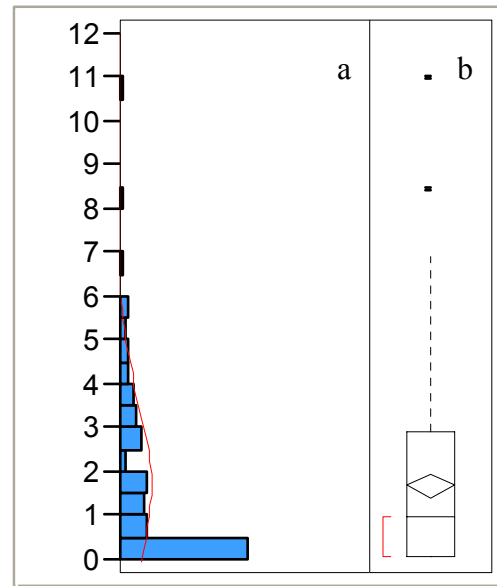


Figura 5.24.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el MgO en lutitas.

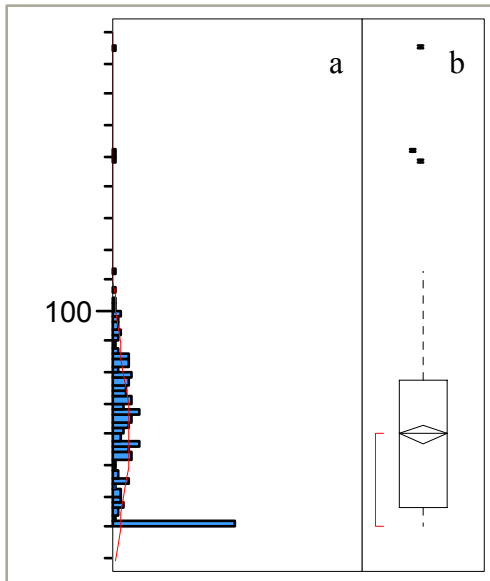
Cuadro 5.16. Estadística descriptiva para el MgO en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (%)	8,428	10,999
Mínimo (%)	0,042	0,043
Media (%)	2,429	1,670
Mediana (%)	1,814	0,977
Desviación Estándar	2,291	1,928
W	0,876	0,816
Prob<W	0,000	0,000

Para cada litología la distribución tampoco es normal, tanto para las areniscas como para las lutitas se observan histogramas totalmente asimétricos (figuras 5.23 y 5.24).

Los valores de la media por litología varían notablemente, (cuadro 5.16) para las areniscas la media es de 2.42%, mientras que para las lutitas es de 1.67%. De la misma manera la desviación estándar es bastante diferente para cada grupo litológico, para las areniscas tiene un alto valor de 2.29%, y para las lutitas un valor de 1.92% que supera el valor de la media antes mencionado. Los altos valores de la desviación

estándar hacen que el diagrama de caja para ambas litologías sea bastante grande, sin embargo en el gráfico se nota que la “caja” es más grande para las areniscas (figuras 5.23.b y 5.24.b)



Cuadro 5.17. Estadística descriptiva para el V.

Máximo (ppm)	185,470
Mínimo (ppm)	30
Media (ppm)	60,073
Mediana (ppm)	60,570
Desviación Estándar	24,538
W	0,909
Prob<W	0.000

Figura 5.25.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el V.

El histograma de frecuencia correspondiente al Vanadio (figura 5.25.a) muestra una distribución no normal con un valor de W de Shapiro-Wilk de 0.90 y una probabilidad menor a 0.01, además existen valores atípicos a lo largo de toda la gráfica tal como se observa en el diagrama de caja (figura 5.25.b).

En el Cuadro 5.17 se observa que la media para todos los datos es de 60.07 ppm, con una desviación estándar 24.53 ppm que se manifiesta en la gran dispersión vista en la gráfica.

Para el caso del V al igual que en el MgO, los valores máximos corresponden a muestras de carbón.

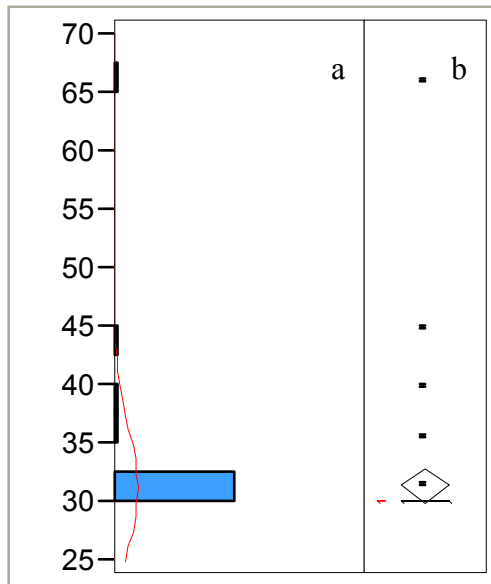


Figura 5.26.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el V en areniscas.

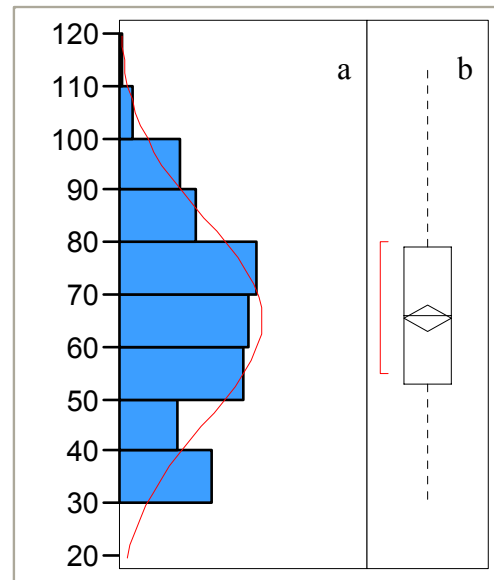


Figura 5.27.a. Histograma de frecuencia y b. diagrama de caja para el V en lutitas.

Cuadro 5.18. Estadística descriptiva para el V en areniscas y lutitas.

	Areniscas	Lutitas
Máximo (ppm)	66,060	113,030
Mínimo (ppm)	30,000	30,000
Media (ppm)	31,281	65,233
Mediana (ppm)	30,000	65,940
Desviación Estándar	5,489	19,429
W	0,273	0,959
Prob<W	0,000	0,000

Se observa en el Cuadro 5.18 que para las areniscas el valor de W es mucho menor (0.273), lo cual se ratifica en la gráfica donde la mayor frecuencia se encuentra entre 30 y 32.5 ppm. Para las lutitas el valor de W es bastante alto (0.959) sin embargo la probabilidad es menor a 0,001 por lo cual podemos afirmar que no existe normalidad.

En el caso de las areniscas el valor de la media es mucho menor (31.28 ppm) con una desviación estándar 5.48, mientras que en las lutitas la media es significativamente mayor (65.23 ppm) con una desviación estándar de 19.42 debido a la gran dispersión que existe.

## Diagramas de dispersión químicos

Los diagramas de dispersión permiten observar si existe algún tipo de relación lineal significativa entre las variables químicas estudiadas. Rodríguez *et al.* (2000) mencionan que en el análisis de los diagramas de dispersión se presentan dos casos principales: la presencia de correlación lineal significativa entre dos variables, bien sea positiva o negativa, o una correlación muy baja entre dos variables.

Cuadro 5.19. Coeficientes de correlación de las variables evaluadas.

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	CaO %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	MnO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	V (ppm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	1,000								
SiO <sub>2</sub> %	-0,074	1,000							
CaO %	-0,364	-0,323	1,000						
K <sub>2</sub> O %	<b>0,918</b>	-0,205	-0,379	1,000					
TiO <sub>2</sub> %	<b>0,842</b>	-0,050	-0,458	<b>0,861</b>	1,000				
MnO %	-0,331	-0,461	0,556	-0,355	-0,484	1,000			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	-0,325	-0,577	0,553	-0,352	-0,496	<b>0,873</b>	1,000		
MgO %	-0,108	0,082	-0,039	-0,211	-0,286	0,100	<b>0,145</b>	1,000	
V (ppm)	0,441	-0,281	-0,357	0,572	0,515	-0,349	-0,307	-0,014	1,000

En el cuadro 5.19 se observan los coeficientes de correlación correspondientes a los datos de la secuencia en estudio. Desde el punto de vista estadístico el coeficiente de correlación para una confiabilidad de 95% es de  $r = 0.113$ , mientras que para un 99% es de  $r = 0.148$ . Los valores representados en rojo son aquellos con probabilidad menor a 0.05 y los azules aquellos con un probabilidad menor a 0.01.

Los valores críticos del coeficiente de regresión obtenidos luego del análisis estadístico (0.113 y 0.148) son valores muy bajos como consecuencia del tamaño de la muestra, que no reflejan un grado de asociación fuerte entre dos variables, por lo cual se decidió considerar como importantes aquellas con coeficientes de correlación de  $\pm 0.700$ , y se resaltan en color azul.

En el cuadro de coeficientes de correlación correspondiente a toda la secuencia en estudio, se observa que sólo cuatro asociaciones de las 36 posibles presentan un valor de correlación alto.

La asociación  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  es la que presenta un valor de correlación más alto (0.918). Ambos elementos mayoritarios están relacionados con la presencia de minerales de arcillas, por ser un coeficiente positivo indica que a mayores valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se encontrarán valores altos de  $\text{K}_2\text{O}$ , como se observa en la gráfica de dispersión de puntos (ver anexo 6).

Al igual que la asociación  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  antes descrita, también se observa que las asociaciones  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O-TiO}_2$  presentan valores de correlación altos y positivos. Estas dos asociaciones también están relacionadas con la presencia de minerales de arcilla, por lo que era de esperarse valores altos de correlación.

La cuarta asociación notable es la correspondiente al  $\text{MnO-Fe}_2\text{O}_3$ , con un valor de correlación de 0.87, lo cual tiene sentido ya que ambos elementos responden de manera similar a las condiciones de oxigenación del medio.

El resto de las asociaciones presenta valores por debajo de 0.70 lo cual indica una correlación baja entre las variables, observándose en el gráfico de dispersión que los puntos no siguen ningún patrón definido (ver anexo 6)

Cuadro 5.20. Coeficientes de correlación de las variables evaluadas en areniscas.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{SiO}_2$ %	$\text{CaO}$ %	$\text{K}_2\text{O}$ %	$\text{TiO}_2$ %	$\text{MnO}$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{MgO}$ %	V (ppm)
$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	1,000								
$\text{SiO}_2$ %	-0,219	1,000							
$\text{CaO}$ %	-0,092	-0,615	1,000						
$\text{K}_2\text{O}$ %	<b>0,898</b>	-0,304	-0,018	1,000					
$\text{TiO}_2$ %	<b>0,800</b>	0,054	-0,306	0,673	1,000				
$\text{MnO}$ %	-0,050	-0,814	0,552	0,092	-0,343	1,000			
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	-0,035	-0,925	0,538	0,073	-0,305	<b>0,889</b>	1,000		
$\text{Mg}$ %	-0,075	0,361	-0,247	-0,159	-0,055	-0,098	-0,176	1,000	
V (ppm)	0,499	-0,061	-0,120	0,607	0,447	-0,064	-0,060	-0,097	1,000



Para el gráfico de dispersión correspondiente a las areniscas, se observa en el anexo 6 como se mantienen las asociaciones  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  con altos valores significativos. En el cuadro 5.20 se observan los coeficientes de correlación correspondientes a las areniscas en estudio. Desde el punto de vista estadístico el coeficiente de correlación para una confiabilidad de 95% es de  $r = 0.250$ , mientras que para un 99% es de  $r = 0.325$ .

A pesar de que las areniscas tienen una media de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  más baja que las lutitas, se conservan las relaciones por la menor presencia de minerales de arcilla.

También se observa como el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al igual que la gráfica general se asocia con el  $\text{MnO}$ . Adicionalmente para las areniscas se asocia con el  $\text{SiO}_2$ , esto producto de las areniscas con alto porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que están presentes en la secuencia.

La otra asociación presente es la del  $\text{SiO}_2\text{-MnO}$ , la cual no se observa para las lutitas ni tampoco en la gráfica general. Esta relación no es del todo confiable, ya que muchos de los valores obtenidos para el  $\text{MnO}$  se encuentran en el límite de detección.

Cuadro 5.21. Coeficientes de correlación de las variables evaluadas en lutitas.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{SiO}_2$ %	$\text{CaO}$ %	$\text{K}_2\text{O}$ %	$\text{TiO}_2$ %	$\text{MnO}$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{MgO}$ %	V (ppm)
$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	1								
$\text{SiO}_2$ %	0,626	1							
$\text{CaO}$ %	-0,349	-0,441	1						
$\text{K}_2\text{O}$ %	0,735	0,245	-0,366	1					
$\text{TiO}_2$ %	0,494	0,468	-0,435	0,637	1				
$\text{MnO}$ %	-0,378	-0,502	0,426	-0,464	-0,602	1			
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	-0,351	-0,440	0,423	-0,501	-0,695	0,852	1		
$\text{Mg}$ %	0,384	0,267	0,048	-0,025	-0,125	0,258	0,311	1	
V (ppm)	0,293	0,011	-0,408	0,521	0,471	-0,364	-0,421	-0,171	1

En el cuadro 5.21 se presentan los coeficientes de correlación correspondientes a las lutitas. Desde el punto de vista estadístico el coeficiente de correlación para una confiabilidad de 95% es de  $r = 0.159$ , mientras que para un 99% es de  $r = 0.208$ .

Las lutitas presentan una dispersión diferente a las antes descritas. En éste caso solo se observan dos asociaciones con valores superiores a 0.70. Al igual que en los gráficos anteriores se mantienen las asociaciones  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  y  $\text{MnO-Fe}_2\text{O}_3$ .

La asociación  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$  parece estar relacionada en todo momento con la presencia de minerales de arcilla, por lo cual siempre es significativa, y de gran ayuda para determinar el tipo de litología presente.

### ANÁLISIS DE AGRUPACIONES

Para realizar el análisis de agrupaciones se utilizó el gráfico de dendogramas con una distancia euclidiana de 4.06. Para dicho análisis no se tomaron en cuenta los datos correspondientes al MnO, MgO y V, debido a que estos presentaban muchos valores en el límite de detección y podrían producir sesgo en la conformación de los grupos.

A partir del dendograma, se obtuvieron como resultado 2 grandes grupos químicos y 3 agrupaciones menores. En la figura 5.28 se puede observar el dendograma obtenido, donde cada color representa un grupo.

En el cuadro 5.22 se observa un resumen de la estadística descriptiva para cada uno de los grupos, así como los resultados de la prueba de medias. Los valores en columnas con letras distintas son estadísticamente diferentes al 0.05%.

Cuadro 5.22. Prueba de medias de los grupos obtenidos.

Grupo	N	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
1	38	5.892 b	68.381 a	0.6440 c	0.2657 b	0.43786 b	6.221 d
2	229	16.195 a	46.934 b	0.4540 c	2.1882 a	0.84299 a	6.356 d
3	6	2.223c	18.481 c	0.6045 c	0.5032 b	0.36701 b	9.822 c
4	11	5.527 c	16.947 c	2.6655 b	0.4297 b	0.23189 c	33.736 a
5	3	5.602 b	40.824 b	6.5100 a	0.3110 b	0.32766 bc	13.285 b
C.V (%)		17,502	14,810	68,436	21,300	15,043	37,532

Cuadro 5.23. Distribución de muestras según su litología en los grupos químicos.

Grupo Químico	Número de muestras	Litología		
		Areniscas	Lutitas	Carbón
Q1	38	36	2	0
Q2	229	5	221	3
Q3	6	0	1	5
Q4	11	9	2	0
Q5	3	3	0	0

En base a lo observado en el dendograma (figura 5.28), las medias (cuadro 5.22) y la distribución de las muestras de cada grupo (cuadro 5.23), se realiza una breve descripción de los cinco grupos químicos obtenidos:

Grupo Q1: Este grupo es uno de los dos grandes grupos obtenidos, está compuesto en su mayoría por areniscas, aunque fueron asignadas dos lutitas por sus valores anómalos de  $Al_2O_3$ . La característica química más resaltante presente en este grupo es el alto valor de la media de  $SiO_2$ , siendo estadísticamente diferente a las medias del resto de los grupos.

Grupo Q2: Este grupo es el mayor de todas las agrupaciones, está compuesto de lutitas que se caracterizan por su alto porcentaje de  $Al_2O_3$ , así como también alto contenido de  $K_2O$ . En este grupo se incluyen 5 areniscas y 3 carbones con valores anómalos de  $Al_2O_3$ .

Grupo Q3: Este grupo está compuesto básicamente por carbones, y una lutita con valores anómalos  $Al_2O_3$ . Químicamente se caracteriza por su bajo contenido de  $Al_2O_3$ , así como también su bajo contenido de  $SiO_2$ .

Grupo Q4: El grupo Q4 también está compuesto en su mayoría por areniscas, que se diferencian de las del grupo Q1 por el alto contenido de  $Fe_2O_3$ , y por el bajo contenido de  $SiO_2$ . Al igual que en el grupo Q1 fueron asignadas dos lutitas con valores anómalos de  $Al_2O_3$ .

Grupo Q5: El grupo Q5 es el grupo con menor número de muestras, solo se le asignaron tres de las 287 en total. Las muestras asignadas corresponden a areniscas, que se diferencia de las descritas en los grupos Q1 y Q4 por un mayor contenido de CaO, el cual se encuentre posiblemente como cemento.

En el cuadro 5.23 se observa la distribución de las muestras correspondientes a cada grupo químico según la litología. Esta distribución es bastante precisa, se observa como para el grupo Q1, de las 38 muestras en total, 36 de ellas corresponden a areniscas. Para el grupo Q2, se observa que 221 muestras del total son identificadas como lutitas. El tercero de los grupos concentra cinco carbones de un total de seis muestras. El siguiente grupo Q4, agrupó nueve areniscas y dos lutitas que presentaban alguna característica que las diferenciaba del resto. Mientras que el quinto y último grupo Q5 consideró solo tres areniscas.

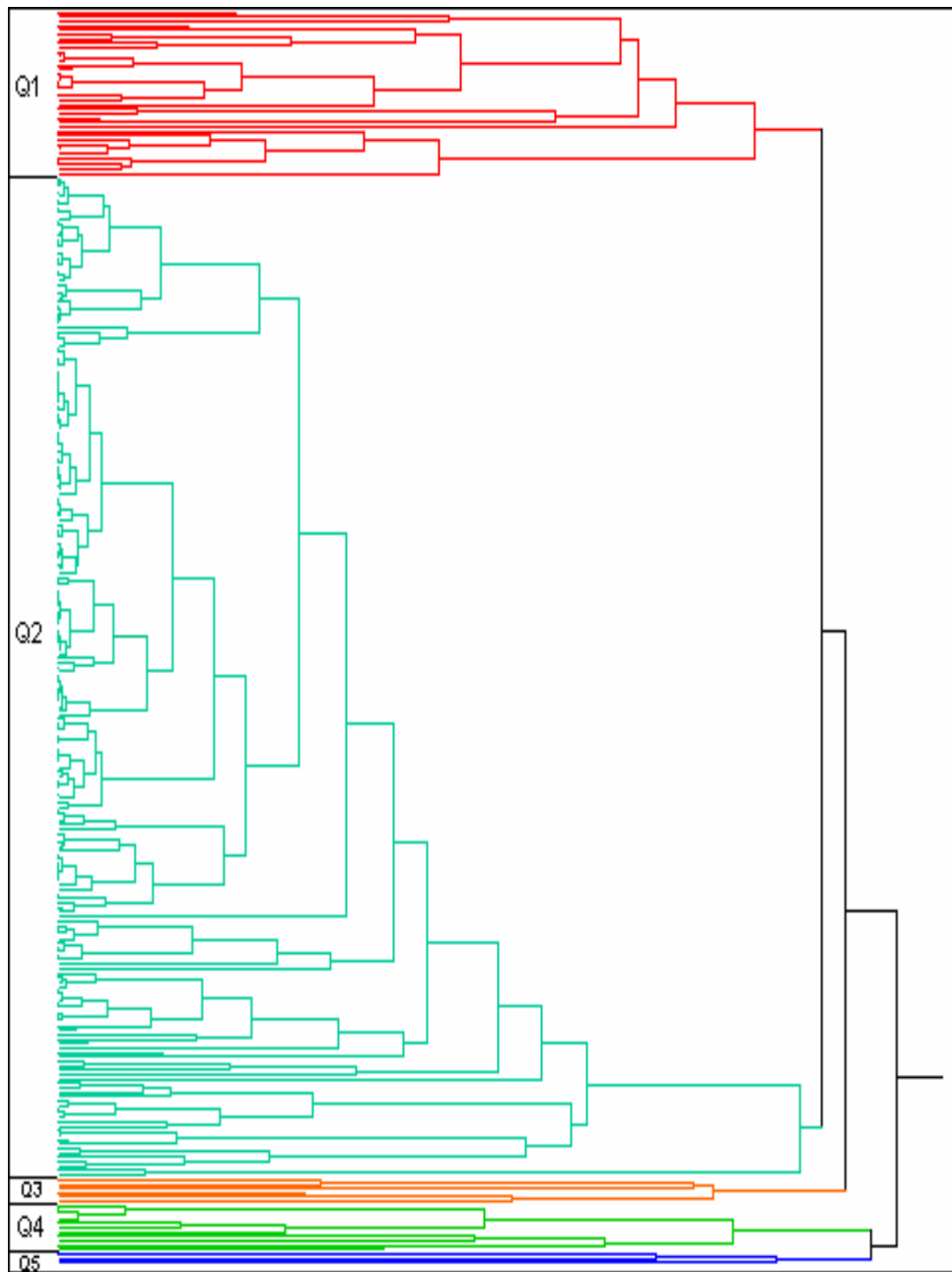


Figura 5.28. Dendrograma correspondientes a todas las muestras de la sección superior de la Formación El Paraíso.

---

## DIVISIÓN DE UNIDADES QUÍMICAS

Para realizar la división de unidades químicas se siguió el mismo criterio usado por Noguera y Yopez (2002), el cual establece que para definir una unidad química es necesario establecer ciertos criterios que permitan en una sección estratigráfica diferenciar y reconocer intervalos con características químicas distintas.

Noguera y Yopez (2002) explican que estas diferencias son determinadas en base a las variaciones químicas que pueden ser observadas en perfiles construidos a partir de la información química. El criterio consiste en ubicar las deflexiones de las curvas más significativas, a las cuales se les denominará *marcadores de primer orden*, los cuales son eventos químicos que se caracterizan por deflexiones importantes en las curvas, de varios elementos, en general cinco o más.

Según Pearce y Jarvis (1995), citados por Noguera y Yopez (2002), cuando las inflexiones de las curvas son observadas en numerosos perfiles de manera simultánea al mismo nivel estratigráfico, este comportamiento puede corresponder a procesos geológicos como condiciones de sedimentación, cambios climáticos, cambios de salinidad, variación en el aporte de sedimentos. Así mismo, Baritto (2003) indica que las unidades químicas se encuentran a su vez limitadas por dos marcadores o entre un marcador y la base o tope de la secuencia.

Para los análisis químicos realizados en esta investigación se definieron dos unidades químicas principales. En el cuadro 5.24 se presentan los valores correspondientes a la estadística descriptiva de las dos unidades químicas definidas en base a los datos obtenidos de los análisis químicos.

Cuadro 5.24. Estadística Descriptiva correspondiente a las unidades químicas

Elemento mayoritario	Media (%)		Máximo (%)		Mínimo (%)		Desviación E		Mediana (%)	
	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 1	Unidad 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,906	12,521	20,795	21,903	1,310	1,003	3,358	5,552	16,619	14,421
SiO <sub>2</sub>	48,593	47,469	64,189	96,325	8,615	8,507	7,006	15,859	48,610	45,650
CaO	0,557	0,688	2,857	7,664	0,250	0,199	0,453	1,069	0,426	0,361
K <sub>2</sub> O	2,050	1,622	3,095	2,885	0,017	0,017	0,628	0,940	2,215	2,002
TiO <sub>2</sub>	0,807	0,706	1,033	1,128	0,124	0,089	0,148	0,253	0,845	0,785
MnO	0,061	0,100	0,784	1,424	0,010	0,010	0,101	0,209	0,035	0,031
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,956	7,196	39,755	39,045	2,244	0,634	4,894	6,758	7,205	5,395
MgO	1,887	1,959	8,436	23,993	0,043	0,042	1,884	2,922	1,537	0,933
V	59,113	60,835	100,850	185,470	30,000	30,000	19,895	27,715	58,730	62,710

A continuación se describe cada unidad química:

Unidad Química QI: esta unidad está ubicada en la parte basal de la columna estratigráfica en estudio, abarca 546,98 metros y comprende los afloramientos I y II, los cuales incluyen las muestras que van desde la MQP-1 a la MQP-40; MQP-375 a la MQP-400 y desde la muestra MQP-600 hasta la MQP-666.

En la unidad I los valores correspondientes al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestran una gráfica relativamente uniforme, en donde los valores se encuentran fluctuando alrededor de la media a excepción de una serie de picos negativos notables, el primer pico ubicado a 9 metros de la base corresponde a las muestras MQP-3 y MQP-4 (areniscas gris oscura de grano fino).

El segundo pico, observado aproximadamente a 360 metros de la base corresponde a la muestra MQP-384 (arenisca negra de grano fino); mientras que los otros picos corresponden a un nivel arenoso asociado a las muestras MQP-622, MQP-629 y MQP-636 (areniscas grises cuarzosas). Desde este nivel arenoso hasta el tope de la unidad la variación es menor, estando cercana a la media.

Los picos negativos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  descritos anteriormente están asociados a areniscas, donde la presencia de minerales de arcilla es menor y por esto el menor valor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presente en la muestra.

Los valores obtenidos de  $\text{SiO}_2$  pueden ser asociados con los de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  antes descritos, los mismos presentan relaciones entre sí a lo largo de toda la unidad. Para el afloramiento #1 los valores de  $\text{SiO}_2$  oscilan alrededor de la media, a excepción de dos picos notables. El primer pico ubicado a 9 metros de la base es producto de las muestras MQP-3 y MQP-4. El segundo pico notable se ubica aproximadamente a 54 metros de la base y es producto de la muestra MQP-20 (arenisca de grano fino gris oscuro) con un alto contenido de  $\text{SiO}_2$ .

En el segundo afloramiento el comportamiento de la gráfica se puede asociar con el del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Al igual que en el afloramiento #1, los valores oscilan alrededor de la media, sin embargo existen una serie de picos que guardan cierta relación con los observados en la gráfica del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El primer pico negativo observado corresponde a la muestra MQP-384 descrita anteriormente en el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El segundo grupo de picos son de carácter positivo, y al igual que los descritos en el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  corresponden a un nivel arenoso ubicado entre las muestras MQP-622 y MQP-636. El resto de los valores de la unidad oscilan alrededor de la media hasta el tope de la misma.

A pesar de estar trabajando en una secuencia siliciclástica, donde la media del CaO es bastante baja (0.557%), se observan unos valores atípicos que posiblemente sean producto de algún proceso diagenético. La curva del CaO muestra en general un comportamiento regular.

El 74% de los valores de CaO correspondientes a esta unidad se ubica por debajo de la media, por lo cual la curva oscila generalmente por debajo de la línea de la media (ver anexo 7). El 26% restante se encuentra ubicado por encima de la línea media, siendo 6 de ellos de características resaltantes. El primer pico positivo es formado por



las muestras MQP-3 y MQP-4; un segundo pico positivo es formado por las muestras MQP-16 y MQP-17; el tercero corresponde a la muestra M384; mientras el cuarto a la muestra MQP-636.

Los mayores valores de CaO descritos están asociados solo con areniscas, donde posiblemente el CaO se encuentre como cemento.

El comportamiento del  $K_2O$  en la Unidad 1 es muy similar al del  $Al_2O_3$  descrito anteriormente. Para el afloramiento 1 los valores fluctúan cercanos a la media, a excepción de un pico negativo resaltante formado por las muestras MQP-3 y MQP-4 como en el caso del  $Al_2O_3$ .

Para el segundo afloramiento de esta unidad los valores tienen un comportamiento más irregular al descrito en el afloramiento 1. Los valores se ubican generalmente por encima de la media. Excepto en los intervalos donde se encuentran muestras de areniscas, las cuales tienen menor contenido de  $K_2O$ , formando así los picos negativos observados en el anexo 7.

El elemento mayoritario  $TiO_2$  está altamente relacionado con el  $K_2O$  antes descrito así como también con el  $Al_2O_3$ . Se observa como los valores oscilan alrededor de la media y una serie de picos negativos formados por las mismas muestras que generan los picos descritos para el  $K_2O$ . El  $TiO_2$ , al igual que el  $K_2O$  y  $Al_2O_3$  es muy útil para determinar el tipo de litología presente en la secuencia en estudio.

Los valores obtenidos del MnO no son de gran utilidad, los mismos presentan muchos valores en el límite de detección, por lo cual el comportamiento de la curva se mantiene casi en su totalidad por debajo de la media a excepción de algunos picos positivos notables. A pesar de la presencia de los picos antes mencionados no se encontró relación alguna con otros elementos mayoritarios, o bien con el tipo de litología presente.

Los valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  observados en la Unidad 1 presentan un comportamiento uniforme que se mantiene cercano a la media. Tres de los valores correspondientes al  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tienen un comportamiento atípico, ubicados por encima del 33% que forman dos picos positivos característicos. El primer pico es formado por las muestras MQP-3 y MQP-4; y un segundo pico formado por la muestra MQP-384.

Al igual que el  $\text{MnO}$ , los valores obtenidos de  $\text{MgO}$  no son de gran utilidad. Un número considerable de valores se ubican en el límite de detección, por lo que la gráfica presenta un comportamiento bastante irregular a lo largo de toda la unidad.

Para la unidad Q1, la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  muestra un comportamiento constante para la mayoría de la unidad, exceptuando el tramo entre las muestras M621 a la M635 donde se observan una serie de picos con tendencia positiva. Dichos picos son producto de las areniscas con mayor contenido de  $\text{SiO}_2$  e indican un mayor aporte de material detrítico de mayor granulometría, así como una menor profundidad del medio de depositación.

La relación  $(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)/\text{CaO}$  no muestra ningún patrón definido, el mismo se mantiene bastante irregular y oscilando en toda la unidad.

La relación  $\text{MnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  indica condiciones de oxidación del medio, sin embargo Yarnick (2000) indica que esta relación es complicada por la formación de facies diagenéticas y singenéticas. Así mismo, Yarnick (*op cit*) también indica que el Mn y el Fe son más solubles en estados reducidos, y se encuentran en concentraciones más bajas en ambientes anóxicos.

A pesar que el Fe responde igual que el Mn en condiciones anóxicas, parte del primero se conserva como sulfuro y la disminución no es tan significativa como en el caso del Mn. Para esta unidad la relación  $\text{MnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  es irregular, observándose una

serie de picos que representan condiciones de mayor oxidación durante la depositación.

La relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  no muestra grandes cambios a lo largo de la unidad Q1 a excepción de 3 picos positivos resaltantes, su comportamiento se mantiene constante, lo cual según Yarnick (2000) es característico de la presencia del mismo tipo y composición de las arcillas.

La relación  $\text{TiO}_2/\text{V}$  no es muy confiable, ya que muchos valores correspondientes al V se encuentran ubicados en el límite de detección. Mientras que la relación  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  no muestra ningún comportamiento característico, se mantiene constante en toda la unidad a excepción de 2 picos positivos correspondientes a muestras con un contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  muy bajo.

Unidad Química Q2: la segunda unidad se encuentra en la parte superior de la secuencia en estudio, abarca 459,97 metros aproximadamente y comprende los afloramientos 3 y 4, que incluyen las muestras que van desde la MQP-400 hasta la MQP-514, y desde la MQP-700 hasta la MQP-744.

En la gráfica que muestra los valores del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se puede observar como estos tienen un comportamiento bastante irregular. A lo largo de la unidad se observa como los valores se encuentran dispersos, que se puede corroborar con la desviación estándar con un valor de 5.51, el cual para esta gráfica se considera importante. Esta curva del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  representa de cierto modo la alternancia de litología presente en la unidad.

Los valores del  $\text{SiO}_2$  son variables, a pesar de no ser tan irregulares como en el caso del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presenta una alta desviación estándar de 15.85. Los picos más altos corresponden a areniscas, mientras que los valores más bajos corresponden a los carbones, lutitas carbonosas, o bien sea areniscas o lutitas con alto contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

La variabilidad que presentan los valores de  $\text{SiO}_2$  no permite determinar exactamente la relación que existe con el tipo de litología presente. Si bien los picos altos corresponden exclusivamente a areniscas, no ocurre lo mismo para los picos bajos, éstos pueden estar asociados con areniscas así como también con lutitas..

Al igual que en la unidad 1, los valores del  $\text{CaO}$  son en su gran mayoría inferiores al 1%, los cuales son característicos de una secuencia siliciclástica donde la presencia de carbonatos no es común.

Del total de muestras recolectadas en la Unidad 2, 138 de ellas muestran un porcentaje de  $\text{CaO}$  inferior al de la media, por lo que al igual que en la unidad 1, la curva del  $\text{CaO}$  oscila en su mayoría por debajo de la línea de la media.

Los picos más altos corresponden a areniscas, siendo el pico más alto está asociado con la muestra MQP-744 (arenisca calcárea). Además, existen 3 lutitas que se distinguen del resto por presentar un mayor contenido de  $\text{CaO}$ , ubicado entre 2.04% y 3.74%.

Los datos obtenidos a partir del  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ , al igual que el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son de gran utilidad, los mismos están relacionados con el tipo de litología presente en la secuencia. Ambas gráficas muestran un comportamiento bastante irregular, lo que refleja la alternancia de litología encontrada en la secuencia en estudio, y que se puede corroborar con la columna estratigráfica.

Al igual que en la unidad 1 los valores del  $\text{MnO}$  no son muy confiables debido al gran número de datos que se encuentran en el límite de detección. Sin embargo, existen una serie de picos positivos que se asocian a aquellas muestras con un alto contenido de hierro.

De la misma manera los valores de MgO no son confiables, muchos valores se encuentran en el límite de detección. Sin embargo, se observan tres picos positivos, el primero con un alto porcentaje de MgO (23,99%) que corresponde a un carbón, el segundo pico también es un carbón aunque con un menor porcentaje; el último pico corresponde a una lutita.

No se encuentra relación alguna de este elemento con algún otro elemento mayoritario, ni bien con algún tipo de litología, aunque pareciera tener cierta relación con el carbón, pero por ser tan pocas muestras de carbón no sería prudente llegar a esta conclusión.

El comportamiento de la curva del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presenta cierta irregularidad, a pesar que un gran número de muestras oscilan muy cercanas a la media, se observan 14 muestras con un alto porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que va desde 12,28% hasta 39,04%. No se haya relación alguna con el tipo de litología, ya que se observan altos porcentajes de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tanto en lutitas como en areniscas.

Generalmente los valores de vanadio están asociados a contenido orgánico, sin embargo en la Unidad 2 no está bien claro del todo. En algunos segmentos de la secuencias parecen tener relación en el tipo de litología, pero no ocurre esto para toda la unidad. La falta de consistencia de esta relación no permite que este elemento mayoritario sea de alta confiabilidad, además presenta muchos valores en el límite de detección.

La relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  al igual que la unidad Q1 presenta un comportamiento constante, a excepción de unos picos positivos que representan las areniscas cuarzosas que tienen bajo contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La relación  $(Al_2O_3/SiO_2)/CaO$  muestra un comportamiento irregular a lo largo de toda la unidad Q2, sin embargo los puntos positivos resaltantes corresponden a las areniscas cuarzosas antes descritas.

La relación  $MnO/Fe_2O_3$  como se explicó anteriormente es difícil de comprender, sin embargo la unidad Q2 presenta un gráfico irregular, pero con valores superiores a los obtenidos en Q1, lo que indica una mayor oxigenación en el medio de depositación.

Para la relación  $Al_2O_3/K_2O$  se observa una gráfica irregular con una serie de picos que corresponden a areniscas que presentan un bajo contenido de  $Al_2O_3$  y un contenido muy reducido de  $K_2O$ . El resto es constante, al igual que Q1 indica que existe un solo tipo de arcilla.

En la unidad Q2 al igual que la unidad Q1, la relación  $TiO_2/V$  no es confiable, ya que el V presenta muchos valores en el límite de detección. El comportamiento observado es bastante irregular para toda la unidad.

El comportamiento de la relación  $TiO_2/Al_2O_3$  es constante a excepción de tres picos notables que corresponden a muestras con un valor de  $Al_2O_3$  muy bajo, el resto de la unidad se mantiene constante muy cerca del valor de la media.

## **FUNCIONES DISCRIMINANTES**

Noguera & Yépez (2002) indican que las funciones discriminantes son utilizadas para predecir a cuál nivel de una variable independiente dada (litofacies, quimiofacies, litología, edad, ambiente, etc.) pertenece una nueva observación. Con estas funciones se pretende determinar las ecuaciones de las funciones que permitirán discriminar una muestra desconocida dentro de las distintas categorías de características como

litología, litofacies y quimiofacies, o bien sea dentro de una formación en específico, en este caso en la Formación Paraíso.

Este procedimiento fue utilizado para generar dos funciones discriminantes correspondientes a cada litología, una función para las areniscas y una función para las lutitas:

$$\text{Areniscas: } -171.672 - 1.902(\text{Al}_2\text{O}_3) + 3.765(\text{SiO}_2) + 14.451(\text{CaO}) + 9.728(\text{K}_2\text{O}) + 100.001(\text{TiO}_2) + 10.014(\text{MnO}) + 6.390(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 4.082 (\text{MgO}) + 0.346 (\text{V})$$

$$\text{Lutitas: } -153.964 - 1.343(\text{Al}_2\text{O}_3) + 3.348(\text{SiO}_2) + 12.282 (\text{CaO}) + 13.759(\text{K}_2\text{O}) + 100.225 (\text{TiO}_2) + 12.746(\text{MnO}) + 5.787(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 3.801 (\text{MgO}) + 0.320 (\text{V})$$

Estas dos funciones fueron utilizadas para determinar a que tipo de litología pertenecen los datos originales de origen conocido. El siguiente cuadro muestra los resultados obtenidos:

Cuadro 5.25. Cuadro de clasificación de las funciones discriminantes por litología.

Litología	Distribución	Areniscas	Lutitas	Total
Areniscas	Número	47	6	53
	Porcentaje	88.68	11.32	100.00
Lutitas	Número	5	221	226
	Porcentaje	2.21	97.79	100.00
Total	Número	52	227	279
	Porcentaje	18.64	81.36	100.00

Los resultados obtenidos mediante las funciones discriminantes para cada litología demuestran que este método es bastante confiable. En la cuadro 5.25 se observa como para las areniscas se tiene un porcentaje de acierto de 88,68, mientras que para las lutitas se tiene un 97.79% de acierto.

El alto grado de confiabilidad de estas funciones discriminantes permite que las mismas sean usadas para determinar el tipo de litología de muestras desconocidas a

las cuales se les haya realizado un análisis de fluorescencia por dispersión de rayos X. Dichas funciones podrán ser usadas posteriormente para clasificar nuevas muestras correspondientes a la sección superior de la Formación El Paraíso.

De igual manera se generaron funciones discriminantes para discriminar entre las unidades químicas Q1 y Q2:

Unidad química Q1:  $-97.144 - 1.446(\text{Al}_2\text{O}_3) + 1.765(\text{SiO}_2) + 0.196(\text{CaO}) + 8.385(\text{K}_2\text{O}) + 69.951(\text{TiO}_2) - 42.790(\text{MnO}) + 4.599(\text{Fe}_2\text{O}_3) + 0.395(\text{MgO}) + 0.323(\text{V})$

Unidad química Q2:  $-86.756 - 1.639(\text{Al}_2\text{O}_3) + 1.685(\text{SiO}_2) + 7.116(\text{CaO}) + 7.950(\text{K}_2\text{O}) + 68.508(\text{TiO}_2) - 30.253(\text{MnO}) + 4.084(\text{Fe}_2\text{O}_3) + 0.430(\text{MgO}) + 0.339(\text{V})$

El siguiente cuadro, muestra los resultados obtenidos de las dos funciones utilizadas para determinar a cual unidad química pertenecen los datos originales de origen conocido:

Cuadro 5.26. Cuadro de clasificación de las funciones discriminantes por unidades químicas.

Unidad Química	Distribución	1	2	Total
1	Número	111	16	127
	Porcentaje	87.40	12.60	100.00
2	Número	47	113	160
	Porcentaje	29.38	70.63	100.00
Total	Número	158	129	287
	Porcentaje	18.64	81.36	100.00

En el cuadro 5.26 se observa que los resultados obtenidos a partir de las funciones discriminantes para cada unidad química no son tan confiables como los



anteriormente descritos para cada tipo litológico. Sin embargo, se observa como para la unidad química Q1 el porcentaje de confiabilidad es de 87.40, lo cual es un porcentaje confiable tomando en cuenta la gran cantidad de muestras en estudio.

La unidad química Q2 presenta un porcentaje de 70.63, menor al descrito para la unidad Q1, pero que sigue siendo confiable para este estudio en particular. En general, el porcentaje de confiabilidad es de 81.36, el cual es altamente confiable tomando en cuenta que la división de unidades químicas fue realizada de manera gráfica, a partir de los perfiles de distribución para una gran cantidad de datos.

### **CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ESQUEMA DE HERRON (1988)**

Se realizó la clasificación según el esquema de Herron, el cual está basado en las concentraciones químicas para clasificar areniscas y lutitas usando los logaritmos naturales de las relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ .

En la Figura 5.29, se observa la distribución de los datos según el esquema de clasificación de Herron (*op cit*). Se observa que el mayor grupo de puntos corresponden a la Lutita, mientras que existen otros dos grupos poblados como son la Lutita-Fe y las areniscas-Fe.

Al realizar la comparación de la litología obtenida a partir de esta clasificación con la descripción realizada en campo, se observó que existe una buena correlación entre estas, se puede diferenciar con buena precisión entre las arcillas y las areniscas.

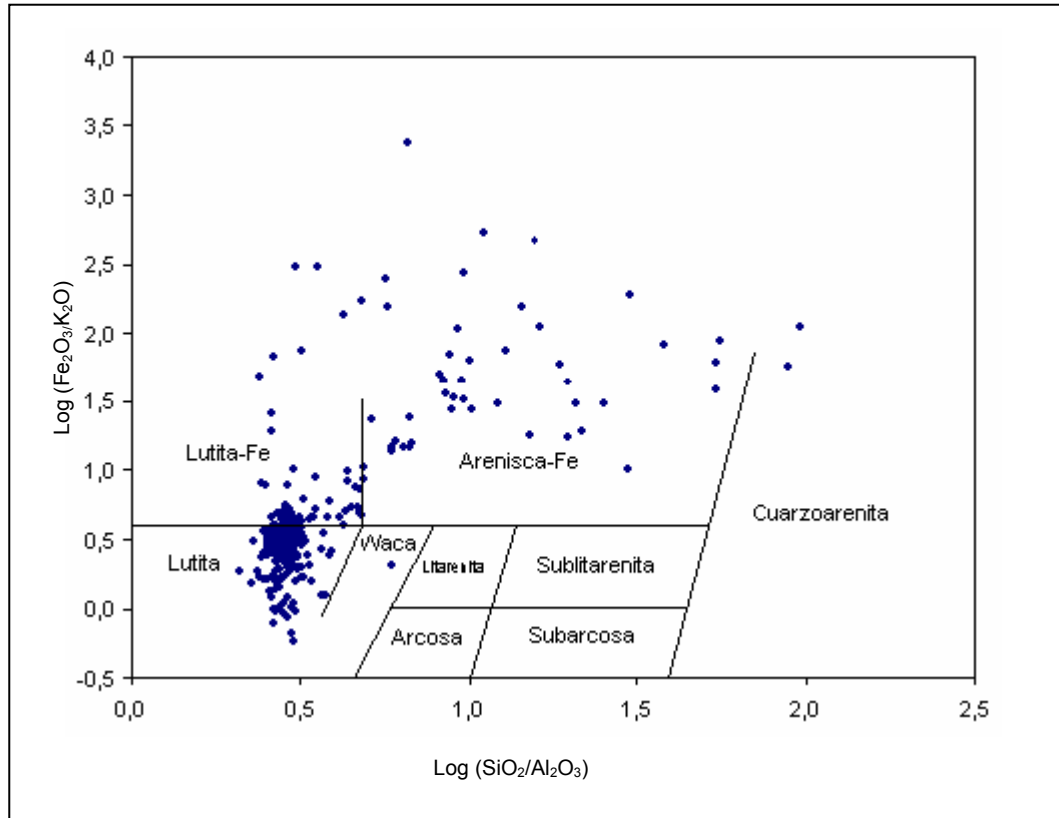


Figura 5.29. Clasificación de los sedimentos terrígenos correspondientes a la sección superior de la Formación El Paraiso según el esquema de Herron (1988).

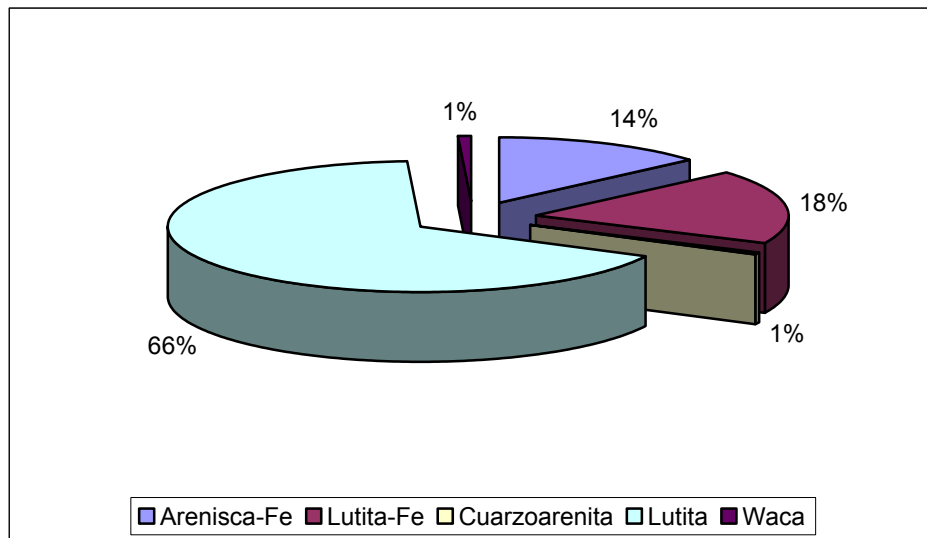


Figura 5.30. Distribución de litología según el esquema de Herron.

En la figura 5.30 se observa la distribución de litología según el esquema de Herron, donde se aprecia que el mayor grupo es el correspondiente a las Lutitas, lo cual era de esperarse ya que en las descripciones de campo se había observado el dominio de las lutitas en la zona en estudio. Los otros dos grupos en orden de importancia son el de Lutita-Fe y Arenisca-Fe, con 18% y 14% del total de las muestras recolectadas.

## CAPÍTULO VI

### ASPECTOS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

Mediante el análisis de las características principales de los datos obtenidos de los análisis químicos y de las facies definidas anteriormente, se presentan las posibles relaciones entre estas.

#### **Relación de datos químicos con los datos litológicos**

Los análisis químicos arrojan datos que reflejan y corroboran las observaciones litológicas hechas en campo. Por lo tanto, las dos unidades litológicas informales definidas anteriormente en base a las características físicas, coinciden con las unidades químicas que se definieron a partir de los datos obtenidos de los análisis químicos.

Los porcentajes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  determinan la presencia de rocas con contenido de arcillas. El alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es producto de los minerales de arcilla (caolinita, smectita, montmorilonita, illita y clorita, Brownlow, 1979), mientras que el alto contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  es producto de la presencia de feldespatos detríticos, así como también en minerales de arcilla.

De esta manera, los mayores valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{K}_2\text{O}$  corresponden a las lutitas, mientras que los menores valores corresponden a las areniscas, a excepción de algunas muestras que presentaron valores anómalos.

En la secuencia en estudio los valores obtenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  permiten diferenciar claramente la litología presente, las areniscas tienen una media de 6.44 %, mientras que las lutitas de 16.08%, el  $\text{K}_2\text{O}$  arrojó valores de 0.39% para las areniscas y 2.17% para las lutitas.

Los valores de  $\text{TiO}_2$ , están relacionados directamente con el tamaño de grano, por lo que a mayor tamaño de grano menor será el contenido de  $\text{TiO}_2$ . Para las areniscas se observó una media de 0.42%, mientras que para las lutitas un valor de 0.84%.

Los datos correspondientes al vanadio no son del todo confiables, sin embargo se observa que los carbones presentan los valores más altos en la secuencia, esto debido a que el vanadio está asociado con la cantidad de materia orgánica presente.

### **Relación de Unidades Químicas con Unidades litológicas**

La relación de las unidades químicas con las unidades litológicas se realiza con la finalidad de corroborar las divisiones hechas en base a las características litológicas. Así mismo, se pretende conocer si las diferencias obtenidas con la litología se pueden asociar a los datos químicos.

En la unidad química Q1, se observan valores mínimos relativos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ , ubicados a 5.74, 363 y 463 metros de la base de la secuencia. Estos valores coinciden con cuerpos arenosos asociados a la facies A3p.

Por su parte, el resto de la unidad muestra valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  cercanos o ligeramente superiores a la media, correspondiendo a los grandes espesores de lutita observados en esta unidad, y que están asociados a la facies L.

Las facies H, que corresponde a un cuerpo de heterolitas no pudo ser identificado mediante los análisis químicos, debido a que dicha fase tiene un espesor aproximado de 2.1 metros, y hay que recordar que el intervalo de muestreo usado fue de 3 metros, por lo que dicha facies solo fue muestreada una vez.

Los niveles máximos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se ubican a 6m y 106m de la base de la secuencia y corresponden a la facies **A3p**, que posiblemente haya estado más expuesto que el resto de la secuencia.

La relación  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  se mantiene constante durante toda la unidad química Q1, a excepción de dos valores ubicados a MQP-384 y MQP-629. La constancia de esta relación indica que el nivel de energía se mantiene constante a excepción de los 2 niveles mencionado anteriormente que representan ligeros aumentos de energía.

El nivel de energía mencionado anteriormente es extremadamente bajo, lo que se refleja por las estructuras sedimentarias presentes en la unidad (laminación paralela), las cuales están asociadas a **A3p**, y que concuerdan con el ambiente de laguna interpretado para la unidad litológica 1.

En la unidad química Q2, a diferencia de la primera unidad, los valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  tienen un comportamiento bastante irregular. Los valores se encuentran oscilando a lo largo de toda la secuencia. Dicho comportamiento refleja la alternancia de litología observada en la unidad litológica 2, que a su vez está representando los cambios de facies de la secuencia.

A pesar del comportamiento irregular, existen tendencias características asociadas a facies específicas. Se observan valores mínimos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  ubicados entre las muestras MQP-409 y MQP-411, entre MQP-482 y MQP-487, y entre MQP-514 y MQP-702, que están relacionados a cuerpos arenosos asociados a las facies **A3c**, **A3r** y **A3c** respectivamente.

Así mismo, los valores más altos de la unidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  corresponden a lutitas de la facies L.

Los niveles máximos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , están ubicados entre las muestras MPQ-403 y MQP-713, donde alcanzó valores máximos hasta de 39%. Estos altos niveles representan periodos de exposición. Este tramo de la secuencia está asociado al ambiente interpretado de marisma alta.

Una vez analizados los datos químicos y litológicos, así como las relaciones entre ellos, se observa alta correspondencia, es decir las unidades litológicas definidas se relacionan con las unidades químicas con bastante precisión, por lo que para futuros trabajos en la sección superior de la Formación El Paraíso se pueden definir unidades litológicas en base a los datos químicos.

## CAPÍTULO VII

### CARACTERÍSTICAS DE ROCA MADRE Y/O ROCA RESERVORIO

#### CARACTERÍSTICAS DE ROCA MADRE

Existen varios métodos para la evaluación de posibles rocas generadoras de hidrocarburos en una cuenca sedimentaria. En este trabajo se utilizó la determinación del carbono total para determinar el potencial.

Malavé (1994) indica que los sedimentos se depositan en conjunto con la materia orgánica, la cual sufre transformaciones desde el momento de la sedimentación. La calidad y el tipo de materia orgánica que llega a los sedimentos está controlada en parte por el ambiente de depósito y puede llegar a estar relacionada con la riqueza orgánica y los nutrientes de las aguas suprayacentes.

Así mismo, Malavé (*op cit*) indica que la distribución de la materia orgánica en los sedimentos está controlada por:

- a) Las olas y corrientes que transportan a la materia orgánica que es de baja densidad respecto a los sedimentos de grano fino y los deposita simultáneamente en aguas tranquilas.
- b) Los ambientes de alta energía hacen que la materia orgánica sea inestable debido a la dinámica de los mismos.
- c) Las partículas arcillosas, por su capacidad iónica pueden absorber algunos tipos de materia orgánica que se encuentran en solución y los transfiere consigo a los sedimentos durante el depósito.



Otro aspecto importante a tomar en cuenta para la distribución de la materia orgánica es la constante oxigenación del medio, que permite que la materia orgánica entre en combustión y por ende la misma no se conserva.

En los niveles más superficiales de soterramiento las transformaciones de la materia orgánica son de tipo bioquímico y los principales agentes que actúan son los microorganismos anaeróbicos. Estos microorganismos pueden degradar a través de procesos enzimáticos las macromoléculas o biopolímeros constituyentes de la materia orgánica, como son las proteínas y carbohidratos y en menor proporción los lípidos y la lignina (Malavé, 1994).

Además, Malavé (*op cit*) explica que las proteínas y carbohidratos son hidrolizados a aminoácidos y azúcares respectivamente, siendo utilizados parte de estos monómeros como nutriente para los microorganismos, mientras que el resto, junto a los lípidos y lignina menos alterados, comienzan a sufrir una serie de reacciones de polimeraciones al azar para formar compuestos llamados ácidos húmicos y fúlvicos.

A medida que aumenta el soterramiento en la cuenca, la actividad bacterial disminuye y las transformaciones más importantes son de tipo geoquímica, prevaleciendo factores como la presión y la temperatura. Las reacciones de polimeración se hacen más complejas, eliminándose grupos funcionales hidrofílicos superficiales y causando insolubilización del material orgánico (Malavé, 1994).

Así mismo, Malavé (*op cit*) señala que el material orgánico insoluble recibe el nombre genérico de húminas que con el tiempo darán origen al querógeno, material precursor del petróleo. El querógeno puede ser de varios tipos, fundamentados en el tipo de materia orgánica constituyente y en las relaciones H/C y O/C. Así se tiene:

Querógeno Tipo I: producto de algas, bacterias y plantas superiores cerosas, generado principalmente en medios lacustrinos. La relación H/C es alta y O/C es baja.

Querógeno Tipo II: producto de algas marinas y residuos de lignina, cutícula, esporas, polen y resinas, de origen tanto marino como terrestre. La relación H/C es relativamente alta y la relación O/C es baja, su potencial generador de hidrocarburos y gas es menor que el observado en el tipo I, pero es muy importante.

Querógeno Tipo III: producto de plantas superiores terrestres (vitrinita). Materiales leñosos: celulosa, lignina. A relación H/C es baja y O/C es mayor que en los tipos I y II. El potencial generador de petróleo es de moderado a bajo.

El producto residual reciclado, materia orgánica inerte y/o oxidada no genera ni gas ni petróleo, esto debido a que La relación O/C es alta y está asociada a una baja relación de H/C.

### **Carbono Total**

El Carbono total se define como la medida de carbono presente en una roca bajo la forma de querógeno y bitumen. El carbono presente en la muestra puede tener dos orígenes: carbono orgánico y carbono inorgánico.

En el presente informe se trabajó con el carbono total presente en la muestra, el cual no varía mucho con respecto al valor del carbono orgánico total. La cantidad de carbono inorgánico para una secuencia siliciclástica es bastante baja, lo cual se puede observar en los valores de CaO mencionados en el capítulo correspondiente a análisis químioestratigráfico.

Se analizaron un total de 49 muestras correspondientes a lutitas y carbones repartidas a lo largo de toda la secuencia (ver anexo 3). Los resultados para cada muestra se observan en el anexo 8. En el siguiente cuadro observan los promedios obtenidos para cada litología:

Cuadro 7.1. Promedios de %COT para cada grupo litológico.

# de muestras	Litología	% COT
8	Carbón	39,681
41	Lutita	1,103

En el cuadro 7.1 se observa como el valor de COT correspondiente al carbón es notablemente superior al observado en las lutitas. Dichos valores eran de esperarse ya que los carbones se forman a partir de materia orgánica.

Malavé (1994) explica que a partir de los valores de COT se obtienen indicios de la capacidad generadora de hidrocarburos que tiene la roca y propone la siguiente clasificación:

Cuadro 7.2. Capacidad generadora de hidrocarburo en base al porcentaje de COT

% COT	Capacidad Generadora
0 – 0.5	Pobre
0.5 – 1.0	Moderada
1.0 – 2.0	Buena
> 2.0	Muy buena

El valor de carbono total obtenido para las lutitas es de 1.103%, y asumiendo que una pequeña fracción corresponda a carbono inorgánico, la capacidad generadora de las lutitas de la sección superior de la Formación El Paraíso es de moderada a buena.

## CARACTERÍSTICAS DE RESERVORIO

González de Juana *et al.* (1980) indican que casi toda la producción de hidrocarburos de la Cuenca de Falcón proviene de arenas sedimentadas en ambientes continentales a epineríticos o neríticos playeros. La porosidad de estas arenas es intergranular y alcanza promedios aceptables a buenos, y de acuerdo a los ambientes antes mencionados el contenido de arcilla es bajo.

En el cuadro 7.3 se observa la porosidad promedio de los principales campos y áreas productoras de la Cuenca de Falcón.

Cuadro 7.3. Porosidad promedio de los principales campos y áreas productoras de la Cuenca de Falcón.

Campo o área	Porosidad
Falcón Occidental	25%
Tiguaje	18%
Cumarebo	28%

Para obtener una porosidad aproximada de las areniscas correspondientes a la secuencia en estudio, se realizó un análisis petrográfico a 3 areniscas características. El siguiente cuadro muestra los resultados obtenidos para dichas areniscas:

Cuadro 7.4. Resultados obtenidos del análisis petrográfico.

Muestra	MQP-415	MQP-400	MQP-483
Facies	A3c	A3c	A3r
Cuarzo (%)	89	93	88
Chert (%)	10	7	7
Minerales Accesorios	Micas, óxidos, circón	Micas, circón	Micas, óxidos
Carbonato (%)	1	0	0
Ortosa (%)	0	0	4
Porosidad (%)	1	< 1	1

Las figuras 7.1, 7.2 y 7.3 muestran los aspectos más resaltantes del análisis petrográfico realizado a las muestras de areniscas antes mencionadas, destacando el alto porcentaje de contenido de cuarzo.

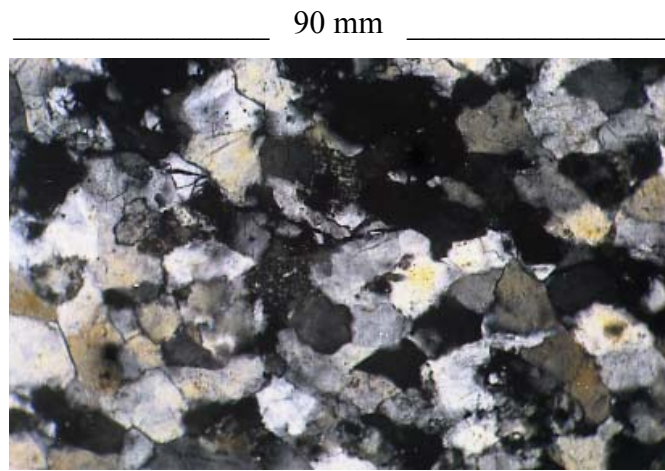


Figura 7.1. Fotomicrografía mostrando cuarzo, ortosa y chert, muestra MQP-400, sección superior de la Formación El Paraíso. Obj. 10x/0,90. Ocular 12.5x, nicoles cruzados.

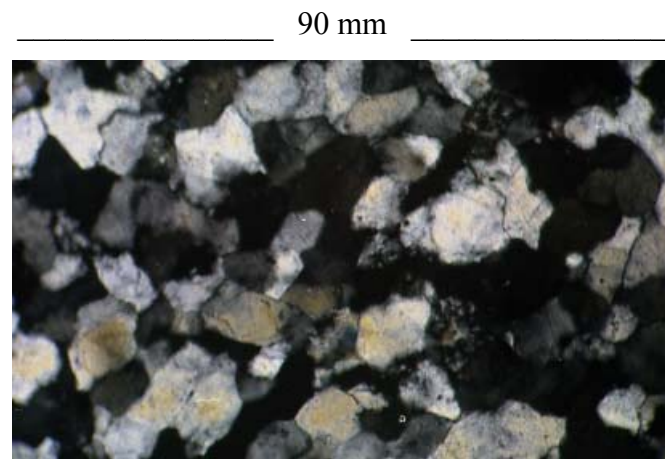


Figura 7.2. Fotomicrografía mostrando cuarzo, ortosa y chert, muestra MQP-415, sección superior de la Formación El Paraíso. Obj. 10x/0,90. Ocular 12.5x, nicoles cruzados.

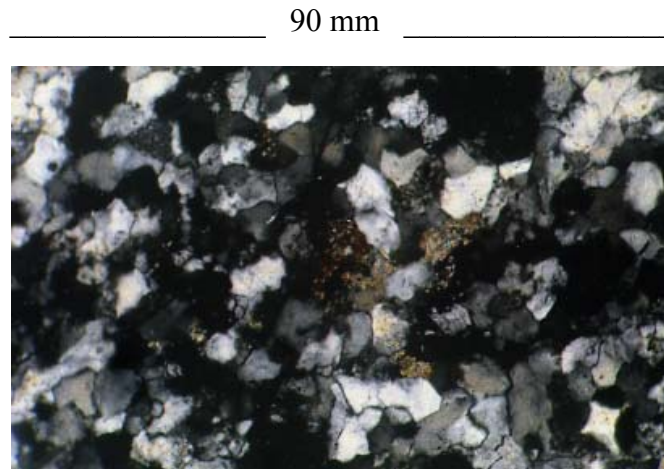


Figura 7.3. Fotomicrografía mostrando cuarzo, ortosa y chert, muestra MQP-483, sección superior de la Formación El Paraíso. Obj. 10x/0,90. Ocular 12.5x, nícoles cruzados.

En base a los resultados obtenidos a partir del análisis petrográfico, se clasificaron las muestras según el esquema de clasificación de areniscas terrígenas de Pettijohn *et al.* (1972) (ver anexo 9). El siguiente cuadro muestra la clasificación obtenida:

Cuadro 7.5. Clasificación según el esquema de clasificación de areniscas terrígenas de Pettijohn *et al.* (1972)

Muestra	Clasificación
MQP-415	Sublitarenita
MQP-400	Sublitarenita
MQP-483	Sublitarenita

Tomando en cuenta los espesores de areniscas muy delgados, así como los porcentajes de porosidad extremadamente bajos obtenidos, y considerando que la porosidad de los principales campos productores de la Cuenca de Falcón es superior al 18%, se infiere que la calidad de reservorio de las areniscas presentes en la secuencia en estudio es mala. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de porosidad secundaria producto del fracturamiento de las areniscas.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

Se definieron dos unidades litológicas, la primera unidad UL1 caracterizada por presentar gran cantidad de lutitas laminadas y masivas, y capas y lentes de areniscas en menor proporción. Por su parte, la unidad litológica UL2 se caracteriza por presentar una intercalación de areniscas, lutitas, carbones y ocasionalmente lutitas carbonosas.

En base al tipo de roca, tamaño de grano y estructura sedimentaria dominante, se definieron 8 litofacies. Se nombró **A3p** a las areniscas de grano fino con laminación paralela; **A3m** a las areniscas de grano fino con moldes de conchas; **A3r** a las areniscas de grano fino con rizaduras; **A3c** a las areniscas de grano fino con estratificación cruzada planar; **A3f** a las areniscas de grano fino con fósiles; **L1** a las lutitas negras laminadas y masivas; **C** a los carbones y lutitas carbonosas y **H** a las heterolitas.

Se definieron dos asociaciones de litofacies, la primera **AF1: Lagunal** compuesta por las litofacies **A3p**, **L1** y **H**. La segunda asociación de litofacies **AF2: Marismas salobres costeras**, la cual a su vez se dividió en dos subasociaciones. La primera subasociación está compuesta por el conjunto de litofacies **A3c**, **A3r**, **A3p**, **L1**, y **C**, mientras que la segunda, está compuesta por el conjunto de litofacies **A3p**, **A3m**, **A3f**, **C** y **L1**.

Las litofacies **A3f** y **A3m**, que pertenecen a una marisma baja, marcan el inicio de una transición de ambiente continental a marino, que da lugar al inicio de un período de transgresión, evidenciado por la depositación de las lutitas de la Formación Pecaya de ambiente marino.

El análisis de agrupaciones hecho a partir del dendograma es bastante preciso, se definieron 5 grupos químicos, de los cuales se obtuvieron 2 grandes grupos y 3 grupos menores.

Se definieron dos unidades químicas siguiendo el criterio de marcadores de primer orden utilizado por Noguera & Yopez (2002).

La presencia de valores atípicos (alta dispersión) es una constante para todas las variables analizadas, incluso al dividir el análisis por tipo litológico. La única excepción presente corresponde a la grafica de  $Al_2O_3$  para las areniscas.

Los porcentajes obtenidos de  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $TiO_2$  determinan la presencia de rocas con contenido de arcilla, por lo cual son fundamentales para diferenciar el tipo de litología presente. Así mismo, las relaciones de dichos elementos,  $K_2O-Al_2O_3$ ,  $TiO_2-Al_2O_3$  y  $K_2O-TiO_2$  son significativas para la secuencia en estudio.

La presencia de vanadio está asociada directamente con la cantidad de materia orgánica presente en la roca, por lo que los mayores contenidos de Vanadio se observa en los carbones de la secuencia en estudio.

Las funciones discriminantes obtenidas para cada tipo de litología tienen muy buena precisión. Para las areniscas se tuvo un 88.68% de precisión, mientras que para las lutitas fue de 97.79%. Por su parte, las funciones discriminantes obtenidas para cada unidad litológica no son tan precisas como las mencionadas anteriormente, sin embargo tienen una buena probabilidad, para la unidad litológica UL1 se tuvo un 87.4%, y un 70.63% para la unidad litológica UL2.

Los análisis químicos corroboran las observaciones de campo. Las dos unidades litológicas informales definidas coinciden con las unidades químicas definidas a



partir de los datos obtenidos de los análisis de fluorescencia por difracción de rayos X.

La constancia de la relación  $TiO_2/Al_2O_3$  refleja un nivel de energía constante, mientras que las estructuras sedimentarias más comunes (laminación paralela) reflejan el bajo nivel de energía característico de ambientes de laguna y/o marismas.

El valor de carbono total obtenido para las lutitas es de 1.103%, lo que infiere que la capacidad generadora de las lutitas de la sección superior de la Formación El Paraíso es de moderada a buena.

Los porcentajes de porosidad obtenidos para las areniscas características son extremadamente bajos, por lo que la calidad de reservorio de las areniscas presentes en la secuencia en estudio es mala. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de porosidad secundaria producto del fracturamiento de dichas areniscas.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un balanceo de la sección superior de la Formación Paraíso para determinar el espesor original de la secuencia.
- Realizar un estudio bioestratigráfico a detalle con el objeto de definir edades relativas de la zona en estudio, posibles asociaciones de foraminíferos, con la finalidad de caracterizar los ambientes transicionales.
- Realizar un estudio regional de facies para la Formación El Paraíso (sección inferior y superior), para analizar las variaciones laterales de los ambientes desarrollados en la unidad. Se recomienda emplear la nomenclatura de

litofacies generada en el presente estudio, aplicable a sucesiones fluvio-deltaicas, y emplear o definir códigos de litofacies que se adapten a ambientes marinos.

- Realizar un estudio de elementos traza y radiometría para completar el análisis quimiestratigráfico realizado en la sección superior de la Formación El Paraíso.
- Realizar un estudio de carbono orgánico total más detallado, con la finalidad de conocer su distribución vertical.

---

---

## CAPÍTULO IX BIBLIOGRAFÍA

- Ai-Gailani M.B.(1980). Geochemical identification of unconformities using semiquantitative x-ray fluorescence analysis. *Journal of sedimentary petrology*. 50 (4): 1261-1270.
- Alvarez, W. (1967). *Geology of the Simurúa and Carpintero areas, Guajira Peninsula, Colombia* [Ph.D. thesis]: Princeton University, 168p.
- Arostegui, G. & C. Machillanda (1999). Modelo determinístico y estocástico del yacimiento C-2, VLE-326 Bloque V LAMAR, Lago de Maracaibo. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela. 213 p.
- Audemard, F., & I.J. Demena (1985). Falcón oriental, nueva interpretación estructural: VI Congreso Geológico Venezolano, Memorias 4, pp. 2317-2319.
- Audemard, F. (1995). La Cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela Nororiental, síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica. IX Congreso Latinoamericano de Geología. South America, Venezuela, Tectonic, Stratigraphy.
- Audemard, F. (1997). Tectónica Activa de la Región Septentrional de la Cuenca Invertida de Falcón, Venezuela Occidental. Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Soc. Venezolana de Geol. – Tomo 1 - 93-100.
- Audemard, F. (2000). “Quaternary tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcón Basin, northwestern Venezuela”. *Journal of Structural Geology*. 23 (2): 431-453.

- Baritto, I. (2003). Caracterización química de muestras de sedimentos superficiales y de núcleos de la fachada atlántica venezolana. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 456 p.
- Bermúdez E., M. López & E. Troconis (2003). Estudio de litofacies, diagénesis, procedencia y quimioestratigrafía de la formación cerro pelado, cuenca de Falcón, como herramienta para determinar su potencialidad generadora y almacenadora de hidrocarburos. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 232 p.
- Bhatia M.R. (1983). Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *F. Geol.*, (91): 611-627.
- Blow, W. H. (1959). Age correlation and biostratigraphy of the upper Tocuyo (San Lorenzo) and Pozon Formations, eastern Falcón, Venezuela: *Bulletin American Paleontology*, (39): 67-252.
- Boesi, T. & D. Goddard (1991). A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcón basins, *AAPG Memoir* (52): 303-319.
- Brownlow A. H. (1979). *Geochemistry*. Prentice Hall. New Jersey. 342p.
- Brueren J. W. R. (1949). Geological Report CPMS-310 Paraíso-Manaure Area Central Falcón. *Congreso Geológico Venezolano*, Caracas (10): 6575-6614.

- Cabrera de Molina, E. (1985). Evolución Estructural de Falcón Central. Trabajo Especial de Grado, M.Sc. no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela. 59 p.
- Camposano, L. & N. Martínez (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. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 245 p.
- Camposano L. (2002). Resultados integrados realizados para optimizar las mediciones con el espectrómetro de fluorescencia de rayos x por energía dispersiva NITON XL-722S. Informe para el Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de rayos X, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 47 p.
- Case, J. E., T. L. Holcombe, & R. G. Martin (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region, in W. E. Bonini, R. B. Hargraves, and R. Shagan, eds., The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics: GSA Memoir (162): 1-30.
- Cedillo J. & W. Olaya (2003). Caracterización química y radiométrica de sedimentos de una zona ubicada al noroeste del Delta del Orinoco en el Océano Atlántico, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 195 p.
- Chacín, C. (2003). Caracterización química y radiométrica de muestras de canal correspondientes a cuatro pozos del Campo Petrolífero La Concepción, estado

Zulia. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 254 p.

CIEN–Comité Interfilial De Estratigrafía y Nomenclatura (1999). Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela. Edic. PDVSA, en CD. Actualización marzo 1999. Caracas.

Compañía Shell de Venezuela (1965). Igneous rocks of the Siquisique region, State of Lara: Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo. Boletín Informativo, (8): 286-305.

Coradossi N., A. Romagnoli, O. Vaselli, & A. Bertini (1991). Mineralogy and geochemistry at the Miocene/Pliocene boundary in the Maccarone stratigraphic sequence (Marche, central Italy). Miner. Petrogr. Acta. Vol XXXIV. p. 13-25.

Coronel G. (1970). “Igneous Rocks of Central Falcón”. Bol. Inf., Asociación Venezolana de Geología, Minas y Petróleo; 13 (5): 155 – 159.

Creole Petroleum Corporation y Exxon Production Research Company (1976). Manual de Facies Clásticas. Editado por D.C. Swanson EPRCo. U.S.A.

Creole Petroleum Corporation. (1962). Mapa de geología de superficie a escala 1:50.000, hoja C-5-A.

Crowell, J.C. (1974). Sedimentation along the San Andreas Fault, California, in Dott, R. H., and Shaver, R. H., eds., Modern and ancient geosynclinal sedimentation: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 19, 292-303 p.

- Davis R. (1985). Coastal sedimentary environments. Springer-Verlag. New York, 716 p.
- Díaz de Gamero, M. L. (1968). Paleontología de la Formación El Veral (Mioceno), Estado Falcón: GEOS, Universidad Central de Venezuela, Caracas, (17):7-51.
- Díaz de Gamero, M. L. (1977). Estratigrafía y Micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del Centro de la Cuenca de Falcón, Venezuela. Geos (22):3-60.
- Díaz de Gamero, M. L. (1985). Estratigrafía de Falcón Nororiental. VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas; (1): 454-502.
- Díaz de Gamero, M. L. (1989). El Mioceno Temprano y Medio de Falcón Septentrional. Geos (29): 25-35.
- Díaz de Gamero, M. L. (1996). The changing course of the Orinoco River during the Neogene: a review, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, (123): 385-402.
- Dott R. H., Jr. (1964). Wacke, greywacke and matrix – what approach to immature sandstone classification? Jour. Sed. Petrology (34): 625-632.
- Erlich, R. & S. Barrett. (1990). Cenozoic Plate Tectonic History of the Northern Venezuela-Trinidad area. Tectonics 9(1): 161-184.
- Escorihuela N. & J. Rondón (2002). Estudio de las rocas ígneas que afloran en la parte central de la cuenca de Falcón. Trabajo Especial de Grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 217 p.

- Fairbridge, R. W. (1980). The estuary: its definition and geodynamic cycle, in Olausson, E. and Cato, I., eds., Chemistry and biogeochemistry of estuaries. New York, John Wiley and Sons, p. 1-36.
- Feo-Codecido, G. (1972). Breves ideas sobre la estructura de la Falla de Oca, Venezuela: Transactions, Caribbean Geological Conference, VI, Margarita, Venezuela, p. 184-190.
- Folk R.L. (1968). Petrology of sedimentary rocks. Austin, Texas: Hemphill's Bookstore, 170 p.
- Friedman, G. & J. Sanders (1979). Principles of Sedimentology. John Wiley & Sons, New York; 792 p.
- Garner, A. H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of the geological formations in Venezuela, Am. Inst Min. Metall. Eng., Tr., p. 677-684.
- González de Juana, C. (1937). Geología general y Estratigrafía de la Región de Cumarebo, Estado Falcón. Bol. Geol. y Min. (Venezuela) (1-2-4): 195-218.
- González de Juana, C. (1951). Introducción al estudio de la geología de Venezuela, Bol. Geol. (Venezuela), 1(2): 195-216.
- González de Juana, C., J. Iturralde, & X. Picard (1980). Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. Ed. FONINVES, Caracas. (1): 407 & (2): 624.
- González, L. & G. Sánchez (2001). Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la Formación La Luna, en el estado Táchira.



Trabajo especial de grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 230 p.

Graf, C. (1969). Estratigrafía Cuaternaria del noroeste de Venezuela. *Asoc. Ven. Geol., Min, y Petr., Bol. Inform.*, 12(11): 393-416

Gravell, D. W. (1933). Tertiary larger foraminifera of Venezuela, *Smithsonian Misc. Coll.*, 89(11): 1-44, pls. 1-6.

Guevara, E. (1967). The Santa Rita, Jarillal and La Victoria formations. *Asoc. Ven. Geol. Min. Petr. Boll Inform.*, 10(2): 51-69.

Halse, G. W. (1937). La estratigrafía del occidente del Distrito Buchivacoa, Estado Falcón, Venezuela, *Bol. Geol. y Min.*, 1(2-4): 183-193.

Haughton P.D.W. (1988). A cryptic Caledonian flysch terrane in Scotland. *F. geol. Soc. Lond.*, (145): 685-703.

Hawkins, R.D. (1983). Contributions to the Petroleum Geology of North-Central Falcón Basin: Informe Interno Inédito. CORPOVEN, S.A.

Herron M. (1988). Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 820-829.

Hill, Patrick A. (1990). Vertical distribution elements in Deposit No. 1 Hat Creek, British Columbia: a preliminary study, *International Journal of Coal Geology*, (15): 77-111.

Hodson, F. (1926). Venezuelan and Caribbean Turritellas, with a list of Venezuela type stratigraphic localities, *Bull. Amer. Paleont.*, 11(45): 173-220

Hunter, V. F. & A.D. Ferrell (1972). Redefinición de algunas unidades estratigráficas del Oligoceno del Falcón central, III Congr. Geol. Venez., Mem., 2: 807-816.

Hunter, V. F. (1974). A Mid-Tertiary stratigraphic unit of the southern Caribbean area. En: Contributions dedicated to the Geology and Paleobiology of the Caribbean and Adyacent Areas. The Kugler Volume, P. JUNG et al., Editores. Verhandl. Naturf. Ges. Basilea. Suiza. 84(1): 520 p.

Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. (1966). Mapa topográfico a escala 1:25.000, hojas 6248-III-NE, 6248-IV-NE y 6248-IV-SE

Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. (1969). Mapa topográfico a escala 1:100.000, hojas 6248 y 6249.

Ituarte L., K. & O. Quijada (1985). Estratigrafía y Sedimentología de un área situada al sureste de Coro, Estado Falcón. Trabajo especial de grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 132 p.

Jaeckli, R. & D. A. Erdman (1952). Geological compilation report - Central and West Falcón, Compañía Shell de Venezuela, 29 p., Inédito

Kellogg J. N. & Bonini W. E. (1982). Subduction of the Caribbean plate and basement umplifts in the overriding South American Plate. American Geophysical Union. Tectonics, 1(3): 251-276

Liddle, R. (1928). The geology of Venezuela and Trinidad. Texas, J. P. MacGowan, 552 p.

- Liddle, R. (1946). The geology of Venezuela and Trinidad. J.P. MacGowan. Fort worth, Texas, 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.
- Mc. Cubbin D.G. (1982). Barrier-Island and Strand-Plain Facies in Sandstone Depositional Environments AAPG Memoir 31.
- Malavé C. L. M. (1994). Litofacies y distribución del carbono orgánico y fósforo en la Formación Colón, Cuenca de Maracaibo. Trabajo especial de grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 150 p.
- Martínez, M. (2004). Metodología de la técnica de determinación de carbono total. Material inédito. 2 p.
- Mason, B. & C. Moore (1958). Principles of Geochemistry. New York, John Wiley and Sons, 310 p.
- Mencher, E., H. J. Fichter, H. H. Renz, W. E. Wallis, J. M. Patterson & R. H. Robie (1951). Resumen geológico, Cap. 1, p: 1-80, en: Texto de las monografías presentadas en la Convención Nacional del Petróleo, Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1956. Léxico Estratigráfico de Venezuela, Bol. Geol. (Venezuela), Publ. Esp. 1: 1-728.
- Miall, A. (1990). Principles of Sedimentary Basin Analysis. Second edition. Springer, Ontario, Canada. 668 p.

Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Venezuela (1970) Léxico estratigráfico de Venezuela: Boletín de Geología, Caracas, Publicación Especial, 1, p. 1-728.

Muessig, K. W. (1978). The central Falcón igneous suite, Venezuela: alkaline basaltic intrusions of Oligocene-Miocene age, *Geol. en Mijin.* 57(2): 261-266.

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.*

Muessig, K. (1984). "Paleomagnetic data on the basic igneous intrusions of the central Falcón Basin, Venezuela". *G. S.A. Memoir (162): 231-237.*

Muller, J., Di Giacomo de E., & A. Van Erve (1987). A palynological Zonation for the Cretaceous, Tertiary, and Quaternary of Northern South América. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation. *AASP Contributions Series. Number 19. 76 p.*

Murray R. W., M. Leinen & A.R. Isern (1993). Biogenic flux of Al to sediment in the central equatorial Pacific Ocean: Evidence for increased productivity during glacial periods. *Paleoceanography*, 8(5): 651-670.

Murray R. W. & M. Leinen (1993). Chemical Transport to the Seafloor of the Equatorial Pacific Ocean across a latitudinal transect at 135 W: Tracking Sedimentary major, trace, and rare earth element fluxes at the Equator and the Intertropical Convergence Zone. *Geochimia and Cosmochimia Acta*, (57): 4141-4163.

- Noguera, M. & S. Yépez (2002). Caracterización química de secciones estratigráficas: Formaciones Naricual y Querecual, Estados Anzoátegui y Monagas. Trabajo especial de grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 281 p.
- Oldow John; Bally Albert; Ave Hans. (1990) GSA Boulder (18): 991-994.
- Ostos, M. (1990). Evolución tectónica del margen Sur – Central del Caribe, basado en datos geoquímicos. Geos (U.C.V.), (30): 1 – 294.
- Passalacqua, M., S. Randazzo, J. Licheri, J. De Mean, J. & F. Audemard (1984). Interpretación Integrada Gravimétrica y Sísmica de un Área del Occidente de Venezuela : Informe N° INT-01042, 84, INTEVEP, S.A. 46p.
- Payne, A. L. (1951). Cumarebo oil field, Falcón, Venezuela: A.A.P.G Bulletin, (35): 1850-1878.
- Pearce T. & I. Jarvis (1995). High resolution chemostratigraphy of quaternary distal turbidites: a case study of new methods for the analysis and correlation of barren sequences. En: Non-biostratigraphical methods of dating and correlation. Geological Society special publication. (89): 107-143.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R. (1972). Sand and Sandstone, Springer-Verlag, New York-Heidelberg, 618 p.
- Pettijohn, F.; P. Potter & R. Sievers (1987). Sand and Sandstone. Springer-Verlag, Berlín; 439 p.

- Petzall, C. (1959). Estudio de una sección de la Formación Caujarao en el anticlinal de La Vela, Estado Falcón: Asociación Venezolana de Geólogos Mineros y Petroleros, Boletín Informativo, (2): 269-319.
- Pindell, J.L., R. Higgs, & Jf. Dewey (1998). Cenozoic palinspastic reconstruction, paleogeographic evolution and hydrocarbon setting of the northern margin of South America. In: Pindell, J.L., Drake, C. (Eds.), Paleogeographic Evolution and Non-Glacial Eustasy, Northern South America. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. 58, 45-85.
- Pitelli, R. & A. Molina (1989). El Eoceno Medio Tardío y Eoceno Tardío de la parte occidental de la cuenca de Falcón, Soc. Venez. Geol., Bol., (36): 5-12.
- Porras L. R. (2000). Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire. VII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Caracas. Tomo I. 279-292 p.
- Potter, P. L. (1967). Sand bodies and sedimentary environments: A review. AAPG Bull., 51, 337-365 p.
- Raadshoven, Van, B. (1951). On some Paleocene and Eocene larger foraminifera of western Venezuela. IIIrd. World Petrol. Congr. Proc. La Haya, Sec. I, 476-489 p.
- Renz, H. H. (1948). Stratigraphy and fauna of the Agua Salada Group, State of Falcón, Venezuela, Geol. Soc. Amer., Mem., 32, 219 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.

- Rodríguez N., A. Ruiz & E. Tundidor (2000). Caracterización química por Fluorescencia de rayos X y radioisotópica por espectrometría gamma multicanal de dos secciones estratigráficas de la Formación Guárico, El Pao, estado Cojedes. Trabajo especial de grado, no publicado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. 265 p.
- Rollinson, H. (1993). "Using Geochemical data. Evaluation, presentation, interpretation". Singapur. Longman Scientific & Technical. 352p.
- Rutsch, R. (1937). Algunos gasterópodos interesantes de la época Terciaria de los Estados Falcón y Lara (Venezuela). Bol. Geol. y Min. Caracas, 1(1): 37-51.
- Schubert, C., & R. S. Sifontes (1970). Boconó fault, Venezuelan Andes: Science, (175): 560-561.
- 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.
- Senn, A. (1940). Paleogene of Barbados and its bearing on history and structure of Antillean- Caribbean region, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 24(9): 1548-1610.
- Silver, E. A., J. E. Case, & H. J. Macgillavry (1975). Geophysical study of the Venezuelan borderland: GSA Bull. (86): 213-226.
- Stainford R. (1962). Definitions of some new stratigraphic units in western Venezuela Las Pilas, Cocuiza, Vergel, El Jebe, Tres Esquinas and Nazaret. Boletín Informativo. 5(10):279-282.

- Sutton, F. A. (1946). Geology of Maracaibo Basin, Venezuela, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull. 30(10): 1621-1741.
- Tschanz, C. M., R.F. Marvin, B. Cruz, H.H. Mehnert, & G.T. Cebula (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia: Geological Society of America Bulletin, (85): 273-284.
- Vásquez E. & Dickey P. (1971). Major faulting in northwestern Venezuela and its relation to global tectonics. VI Conferencia Geológica del Caribe. 191-202.
- Vierbuchen, R.C. Jr. (1978). The tectonics of northeastern Venezuela and the southeastern Caribbean Sea [Ph.D. thesis]: Princeton University, 175 p.
- Walker, R. (1992). Facies Models = Response to sea level change. Geological Association of Canada, Ontario, Canada, 409 p.
- Wheeler, C. B. (1960). Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno inferior de Falcón occidental y nororiental, III Congr. Geol. Venez., Mem., (1): 407-465.
- Wheeler, C. B. (1963). Oligocene and lower Miocene stratigraphy of western and northeastern Falcón Basin, Venezuela, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 47(1): 35-68.
- Wiedenmayer, C., 1924. Zur Geologie von Ostfalcon (Nordwest-Venezuela), *Eclog. Geol. Helv.*, 18(4): 508-512.
- Wilcox, R. E., T.P. Harding, & D.R. Seely (1973). Basic wrench tectonics. American Association of Petroleum Geologists Bull. (57): 74-96.
- Winchester, J.A. & Max M.D. (1989) Tectonic setting discrimination in clastic sequences: an example from the late Proterozoic Erris group, N.W Ireland. Precambrian Res. (45): 191-201.



Yarincik, K. M., R. W. Murray, T. W. Lyons, L. C. Peterson & G. H. Haug (2000). Oxygenation history of bottom waters in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578.000 years: Results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn, and Fe). *Paleoceanography*, 15 (6): 593-604.

Zambrano, E., E. Vásquez, B. Duval, M. Latreille & B. Coffinieres (1971). Síntesis paleogeográfica y petrolera del occidente de Venezuela: Memoria, Congreso Geológico Venezolano, IV, Caracas, 1969, Venezuela. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Boletín de Geología, Publicación Especial Especial no. 5, v. 1, p. 481-552.

### **Referencias electrónicas**

[Http:// www.ifpac.com/IFPAC00/IFPAC00Directory.html](http://www.ifpac.com/IFPAC00/IFPAC00Directory.html) [Consulta: 2003, octubre 30]

[Http://www.spectro-ai.com/pages/e/p0105wp01.htm](http://www.spectro-ai.com/pages/e/p0105wp01.htm) [Consulta: 2003, octubre 30]

[Http://www.spectro-ai.com/pages/e/p0105.htm](http://www.spectro-ai.com/pages/e/p0105.htm) [Consulta: 2003, octubre 30]

[Http://www.panalytical.com/technologies/xrf/simultaneous\\_sm/index.stm](http://www.panalytical.com/technologies/xrf/simultaneous_sm/index.stm) [Consulta: 2003, octubre 30]

[Http://www.panalytical.com/technologies/xrf/](http://www.panalytical.com/technologies/xrf/) [Consulta: 2003, octubre 30]

[Http://www.mapasdevenezuela.com](http://www.mapasdevenezuela.com) [Consulta: 2003, octubre 30]