

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA



**“EVOLUCIÓN Y GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS HOLOCENOS PROXIMALES
DEL SISTEMA LAGUNAR DE HIGUEROTE, ESTADO MIRANDA. NÚCLEO HSR-1”**

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la Ilustre Universidad Central de
Venezuela, por la Br. Carla Andreína
Zorrilla Amarista, para optar por el título
de Licenciado en Química.

Caracas, Mayo 2010.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo la caracterización geoquímica de los elementos mayoritarios presentes en los sedimentos recolectados en la paleolaguna ubicada al noroeste de la población de Higuerote, a 3 Km de la costa oriental del Estado Miranda y la identificación de posibles cambios paleoambientales recientes. Los sedimentos fueron recuperados usando el tomador de núcleos de sedimentos no consolidados de 1,5 m de longitud fabricado en el Centro de Geología del Instituto de Ciencias de la Tierra para este fin, el cual emplea un sistema de percusión, permitiendo recuperar los sedimentos sin inducir deformación. El núcleo recuperado HSR-1 tiene una longitud de 50 cm, se realizó un muestreo sistemático de alta resolución cada 5 milímetros y se analizaron por FRX (Fluorescencia de Rayos X) y AES (Espectrometría de Emisión Atómica), para determinar las concentraciones de los elementos: Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MnO , Na_2O , SiO_2 y TiO_2 . Éstos muestran el límite de dos quimiofacies caracterizadas por materia orgánica y depósitos siliciclásticos. El sodio disminuye gradualmente hacia el tope, el hierro y el manganeso aumentan en la sección oxidada con mayor bioturbación, mientras que los incrementos del calcio son debidos a la presencia de minerales de yeso por precipitación de agua marina, otros minerales como cuarzo, illita, goethita, dolomita y calcita están presentes. Además, se concluye que la sección de la base, corresponde a un paleosuelo de manglar existente hace 2500 años tomando la tasa de sedimentación de 0,2 mm/año típica para sedimentos lagunares de la costa centro-oriental de Venezuela. Estos resultados indican que ha existido una disminución significativa del aporte de influencia marina en el sistema ocasionando la desaparición de lagunas de gran envergadura en la región, dando paso a una sedimentación siliciclástica predominante hasta colmarla completamente. Tomando en cuenta un contexto de transgresión marina global, los resultados sugieren de manera preliminar que localmente existe una regresión, forzada probablemente por un aumento significativo en la tasa de sedimentación en la costa.

Palabras claves: laguna costera, Holoceno, geoquímica, amenazas naturales.

ACTA

Los abajo firmantes asignados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Evolución y Geoquímica de los Sedimentos Holocenos Proximales del Sistema Lagunar de Higuerote, Estado Miranda. Núcleo HSR-1”. Presentado por la Br. Carla Andreína Zorrilla Amarista, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el Título de Licenciado en Química.

Prof. Eduardo Carrillo

Tutor

Prof. José Méndez

Jurado

Prof. Manuel Martínez

Jurado

Yo Profesor Eduardo Carrillo, Investigador del Centro de Geología del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela. Certifico que, el presente Trabajo Especial de Grado, titulado: “Evolución y Geoquímica de los Sedimentos Holocenos Proximales del Sistema Lagunar de Higuerote, Estado Miranda. Núcleo HSR-1”

Que presenta la Br. Carla Andreína Zorrilla Amarista, para aspirar al título de Licenciado en Química, ha sido realizado en el Centro de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, bajo mi dirección, durante los años 2009 y 2010, con esta fecha autorizamos su presentación.

Caracas, mayo de 2010.

Tutor

A mi Mamá
Por haber dedicado su vida a nosotras
Por toda su fortaleza inspiradora
Por estar presente en todo momento

Agradecimientos

A la Universidad Central de Venezuela por abrirme sus puertas y formarme académicamente para ser una profesional de las Ciencias de la Tierra.

A la Facultad de Ciencias en especial a la Escuela de Química por todas las enseñanzas brindadas en el ámbito químico.

Al Instituto de Ciencias de la Tierra por recibirme para hacer mi mención en Geoquímica, en donde conseguí mi Norte en el mundo de las Geociencias.

A mi tutor Dr. Eduardo Carrillo, por guiarme y apoyarme en todo momento, en especial durante la elaboración de este trabajo, por todas las enseñanzas brindadas, MIL GRACIAS.

Al Laboratorio de Geología y Geoquímica 330 de la Escuela de Geología de la Facultad de Ingeniería UCV, por abrirme las puertas y permitir la realización de los análisis químicos en su laboratorio. Al Laboratorio de Sedimentología, Laboratorio de ICP, Laboratorio de DRX, Laboratorio de Geoquímica Orgánica y Laboratorio de Geoquímica Ambiental, todos laboratorios del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias UCV, por permitirme realizar la parte experimental de este trabajo en sus instalaciones.

Al Centro de Geología por tener a mi disposición un espacio de trabajo cómodo donde realicé diversas actividades de mi Trabajo Especial de Grado.

A las Bibliotecas de la Facultad de Ciencias UCV, de la Escuela de Geología, Geofísica y Minas de la Facultad de Ingeniería UCV, de la Fundación la Salle, del IVIC y de FUNVISIS, por permitirme realizar consultas y brindarme información bibliográfica.

Al Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar por tener disponible el material fotogeológico utilizado. Al Taller Mecánico de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias UCV por sus servicios y a la empresa Giropak por el asesoramiento mecánico. Al Departamento de Oceanología y Ciencias Costeras del IVIC por proponer el estudio de las Costas Venezolanas.

Al CDCH, Proyecto PI-03-00679-2007, por el financiamiento de este Trabajo Especial de Grado.

Al Prof. José Vicente Gutiérrez, a la Dra. Luz Esther Sánchez, por toda su colaboración y enseñanzas durante este trabajo.

A mis padres por el apoyo incondicional durante toda mi carrera y en especial durante la esta última etapa. A mi hermana por estar ahí apoyándome a su manera. A mis verdaderos amigos, por estar presentes durante mi vida en la UCV.

A todos Gracias...

Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Marco teórico	4
3.1. Sistemas lagunares.....	4
3.2. Lagunas costeras en Venezuela	8
3.3. El Holoceno en Venezuela	13
3.4. Corrientes y mareas en la Costa Oriental de Venezuela.....	15
3.5. Ecosistemas de manglares	17
3.6. Geología Regional.....	21
3.7. Actividad Sísmica Local	25
3.8. Geoquímica de los sedimentos y aplicaciones quimioestratigráficas	29
3.9. Principios fundamentales de las técnicas analíticas usadas	35
4. Metodología experimental	40
4.1. Etapa pre-campo.....	40
4.1.1. Interpretación geomorfológica preliminar del área de estudio	40
4.2. Etapa de campo	43
4.2.1. Recolección del Núcleo HSR-1.....	44
4.3. Etapa de laboratorio	44
4.3.1. Proceso de apertura del Núcleo HSR-1.....	45
4.3.2. Muestreo sistemático	47
4.3.3. Tratamiento físico y químico de las muestras.....	48
4.4. Análisis de las muestras.....	50
4.4.1. Determinación de elementos mayoritarios mediante FRX y AES	50
4.4.2. Identificación de fases minerales por DRX	53

4.4.3. Análisis complementarios	54
5. Resultados	56
5.1. Geomorfología del sistema lagunar de Higuerote	56
5.2. Descripción sedimentológica del Núcleo HSR-1	61
5.3. Determinación aproximada de la edad del Núcleo HSR-1	66
5.4. Estimación del nivel de marea local.	67
5.5. Mineralogía del Núcleo HSR-1	69
5.6. Distribución estratigráfica de las variables estudiadas	72
5.7. Tratamiento estadístico de los datos obtenidos y pruebas de normalidad.	74
6. Análisis de resultados	77
7. Reconstrucción Paleoambiental	92
8. Conclusiones.....	95
9. Recomendaciones	96
10. Referencias bibliográficas	97
11. Apéndices.....	101

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del lugar de estudio. Situación relativa en el Estado Miranda-Venezuela.	1
Figura 2. Laguna costera separada del océano por una isla de barrera.	4
Figura 3. Ambiente sedimentario lagunar y sus sub-ambientes.	6
Figura 4. Distribución de facies en un corte perpendicular a la costa.	6
Figura 5. Distribución de facies en un corte paralelo a la costa.	6
Figura 6. Tipos de lagunas costeras según su geomorfología.	7
Figura 7. Ubicación de las principales lagunas costeras en Venezuela.	9
Figura 8. Estudio en la Laguna de Unare y registros sedimentarios.	11
Figura 9. Variación del nivel del mar en las Costas Venezolanas durante el Holoceno.	14
Figura 10. Velocidades y direcciones de la corriente marina en el Golfo de Cariaco.	17
Figura 11. Mapa Geológico de Venezuela.	23
Figura 12. Evolución de la Cuenca de Barlovento.	24
Figura 13. Ubicación de los epicentros de los últimos sismos de magnitud conocida.	27
Figura 14. Neotectónica en la Costa Oriental de Venezuela.	29
Figura 15. Separación geoquímica de algunos elementos según su potencial iónico.	31
Figura 16. Diagrama Eh-pH genérico.	33
Figura 17. Difracción de rayos X producida por un cristal.	38
Figura 18. Identificación de unidades geomorfológicas en las fotografías aéreas.	42
Figura 19. Ubicación del Núcleo HSR-1.	43
Figura 20. Etapa de Campo, extracción del núcleo HSR-1.	45
Figura 21. Proceso de apertura del núcleo HSR-1.	46

Figura 22.	Muestreo sistemático cada 5 mm.....	47
Figura 23.	Etapa de fusión de las perlas.	49
Figura 24.	Etapa de disolución de las perlas.....	50
Figura 25.	Montaje de la muestra de polvo para análisis de FRX.	51
Figura 26.	Análisis en el equipo de FRX.	52
Figura 27.	Análisis en el equipo de absorción atómica.	53
Figura 28.	Análisis en el equipo de difracción de rayos X.	54
Figura 29.	Interpretación geomorfológica de las fotografías aéreas del año 1936.....	59
Figura 30.	Interpretación geomorfológica de las fotografías aéreas del año 1992.....	60
Figura 31.	Minerales de yeso.	63
Figura 32.	Difractograma de los cristales, indicando la fase mineral de yeso. .	63
Figura 33.	Columna estratigráfica del Núcleo HSR-1.....	64
Figura 34.	Detalles de la columna estratigráfica del Núcleo HSR-1.....	65
Figura 35.	Calibración de los datos de ^{14}C de la Laguna de Unare.....	67
Figura 36.	Medida de las mareas en la Laguna La Reina.	68
Figura 37.	Distribución mineralógica en la columna.	71
Figura 38.	Distribución estratigráfica de todas las variables.....	73
Figura 39.	Asociación de Variables.	77
Figura 40.	Asociación Orgánica-Transicional.	79
Figura 41.	Perfiles de la Asociación Orgánica-Transicional	82
Figura 42.	Asociación Redox.....	83
Figura 43.	Perfiles de la Asociación Redox.	85
Figura 44.	Asociación Detrítico-Continental.	86
Figura 45.	Perfiles de la Asociación Detrítico-Continental.....	88
Figura 46.	Perfiles del CaO	90
Figura 47.	Reconstrucción Paleoambiental de la Planicie Lagunar de Higuero	94

Índice de Tablas

Tabla 1. Lagunas costeras y humedales venezolanos.....	8
Tabla 2. Características generales de las principales lagunas de Venezuela.....	9
Tabla 3. Registros Sísmicos en la Región de Higuero.....	26
Tabla 4. Registros de Riesgos Geológicos para la Región de Higuero	28
Tabla 5. Características de las fotografías aéreas	41
Tabla 6. Mineralogía determinada por DRX de los sedimentos del Núcleo HSR-1.....	69

Índice de Apéndices

Apéndice 1	Difractogramas del Núcleo HSR-1.....	101
Apéndice 3	Datos de la relación porcentual mineralógica.	105
Apéndice 4	Variables analizadas del Núcleo HSR-1.....	106
Apéndice 5	Tratamiento estadístico.	107
Apéndice 6	Resultados del error absoluto relativo.	108
Apéndice 7	Cajas gráficas de las variables.....	109
Apéndice 8	Histogramas de las variables.	110
Apéndice 9	Resultados de la Prueba de Normalidad.	111

1. Introducción

El estudio de la evolución paleoambiental de un sistema durante el Holoceno, requiere, por tener una corta duración en la escala del tiempo geológico, observar con un alto nivel de resolución las variaciones preservadas en los registros sedimentarios, ya que en los detalles se encuentran valiosas informaciones acerca de los procesos ocurridos en el pasado.

Para llevar a cabo este estudio, se escogió la Planicie Lagunar, ubicada al noreste de Higuerote, en el Estado Miranda, como se muestra en la figura 1, siendo este lugar, el propicio para recuperar mediante un tomador de núcleos, un registro sedimentario que guarde en su contenido toda la información de interés para realizar las reconstrucciones paleoambientales deseadas de este paleoambiente.

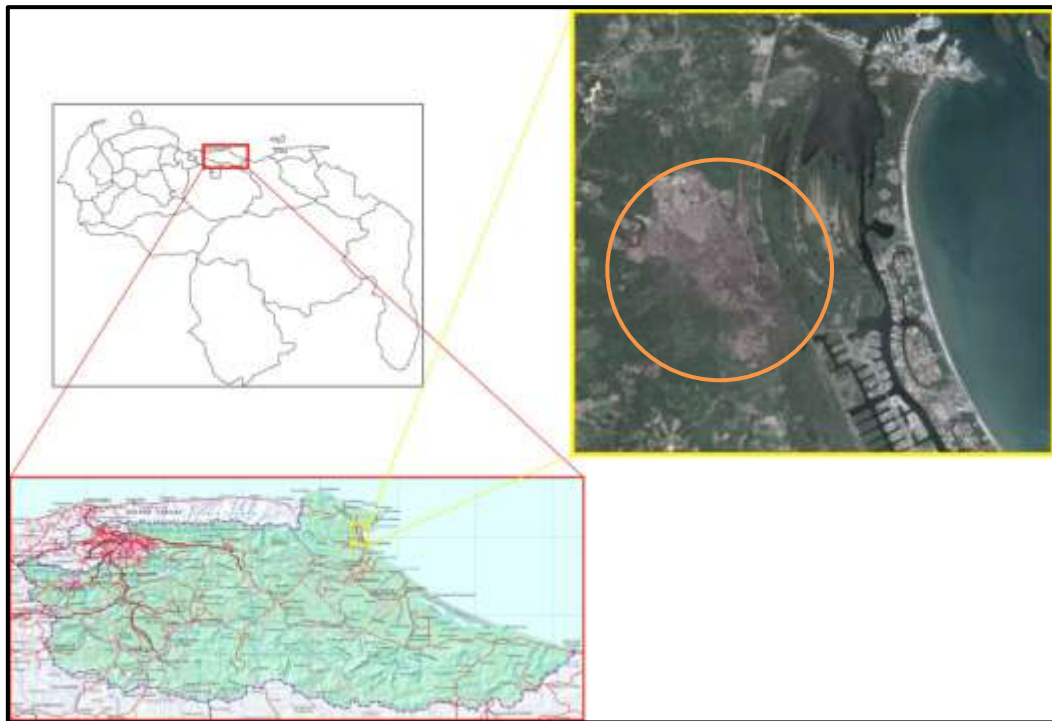


Figura 1. Ubicación del lugar de estudio. Situación relativa en el Estado Miranda-Venezuela.

El Sistema Lagunar de Higuero al ser estudiado geomorfológicamente permite la identificación de los subambientes que lo conforman, siendo estos sedimentos del Cuaternario, provenientes del Río Tuy, ubicado a 25 Km aproximadamente al sureste en la costa oriental del Estado Miranda. Transportados por las corrientes del Golfo de Cariaco y depositadas sobre el promontorio rocoso del Miembro Carenero de la Formación Aramina.

Los parámetros fisicoquímicos que controlan la movilidad de los elementos en un sistema natural abierto, serán los que definirán cuales serán los minerales estables en determinadas condiciones, y serán depositados en el Sistema Lagunar de Higuero, durante toda su evolución, y es por ello, que la caracterización geoquímica de estos sedimentos, permitirán establecer la dinámica sedimentaria y los cambios ocurridos durante su evolución.

El análisis geoquímico del registro sedimentario recuperado en el Núcleo HSR-1, junto con las interpretaciones geomorfológicas, brindaran las herramientas necesarias para reconstruir la evolución del sistema Lagunar de Higuero, el cual representa un ambiente sedimentario de paleolaguna, guardando en profundidad la historia de las condiciones, procesos y ecosistemas, que la influenciaron hasta llegar a las condiciones de hoy en día.

Al establecer los parámetros iniciales de este estudio, se plantean los siguientes objetivos, que se llevaran a cabo en este Trabajo Especial de Grado.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Establecer la dinámica sedimentaria holocena en el sistema lagunar de Higuero de Higuero registradas en el núcleo HSR-1.

Para el cumplimiento del objetivo general, se proponen llevar a cabo una serie de actividades que están enmarcadas a continuación:

2.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis geomorfológico de la evolución reciente del área de estudio.
- Describir la sedimentología y estratigrafía del núcleo HSR-1.
- Determinar la distribución de los elementos mayoritarios en los sedimentos recolectados.
- Evaluar las variaciones químicas de los sedimentos según la estratigrafía para interpretar su posible evolución.
- Identificar las fases minerales presentes en los sedimentos de interés.
- Asociar la señal geoquímica con la identificación de eventos de amenaza costera.

3. Marco teórico

3.1. Sistemas lagunares

Las lagunas costeras, son cuerpos de agua superficial, comúnmente con una forma elongada orientada de forma paralela a la línea de costa, separadas parcial o totalmente del mar ^[1], por la depositación de una isla de barrera alargada o banco de arena, producidos por las corrientes del mar y la energía de las olas o por el crecimiento de arrecifes de coral y en algunos casos por subsidencia producto de la evolución tectónica ^[2]. Poseen una conexión intermitente con el mar por uno o varios canales angostos ubicados en las islas de barreras y en ocasiones por fuertes tormentas y tsunamis, recibiendo agua y sedimentos depositados en la cuenca oceánica ^[3]. La figura 2, muestra la ubicación de estos subambientes en una laguna litoral.

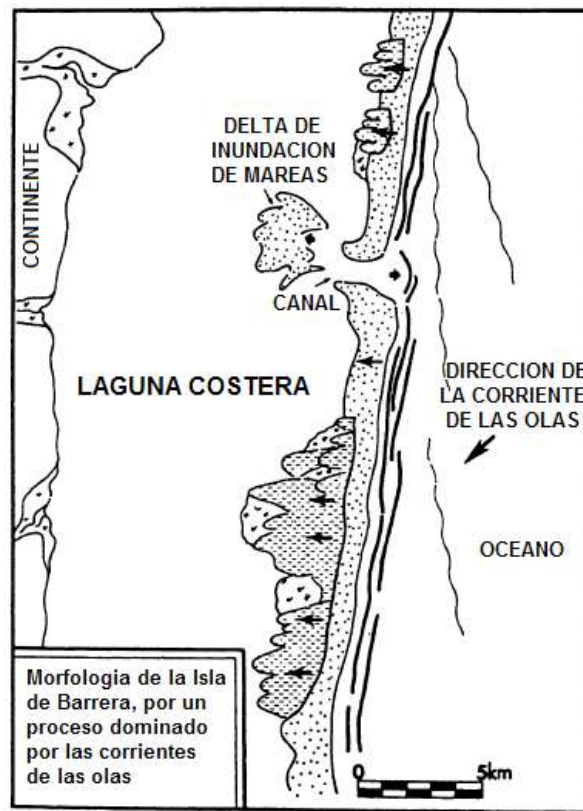


Figura 2. Laguna costera separada del océano por una isla de barrera. (Modificado de [4]).

Un esquema del ambiente sedimentario lagunar y sus correspondientes sub-ambientes, se muestra en la figura 3, destacando la distribución de las facies presentes, mediante un corte perpendicular en la figura 4 y otro paralelo a la costa en la figura 5.

Las lagunas costeras ocupan un 13% de las áreas costeras alrededor del mundo y frecuentemente están siendo impactadas por influencias naturales y antrópicas. Dependiendo de las condiciones climáticas locales, las lagunas presentan salinidades que van desde agua fresca hasta hipersalinas. Las lagunas costeras presentan tamaños variables, desde unos pocos metros cuadrados hasta más de 10.000 Km², como es el caso de la Lagoa dos Patos en Brasil. La profundidad del agua comúnmente varía entre 1 y 3 metros, sin sobrepasar los 5 metros ^[6].

En la escala del tiempo geológico, las lagunas costeras poseen muy corta vida ya que están expuestas a cambios originados por las variaciones del nivel del mar, actividad tectónica local, cambios climáticos y actividades antrópicas. Se ven influenciadas por las entradas de los ríos, la tensión del viento, las corrientes, el balance de los procesos de precipitación y evaporación, y el calor superficial, dando diferentes respuestas a cada situación natural ^[6].

Los sistemas lagunares, están formados principalmente por sedimentos finos, con tamaños de grano entre limos y arcillas, aunque también está la presencia de arenas finas, transportadas por el viento, proveniente de las dunas de arenas depositadas en las islas de barrera ^[7]. Según su geomorfología y el intercambio de agua con el mar, pueden clasificarse en tres tipos, presentes en la figura 6, lagunas de canal angosto, lagunas restringidas y lagunas de múltiples salidas ^[6].

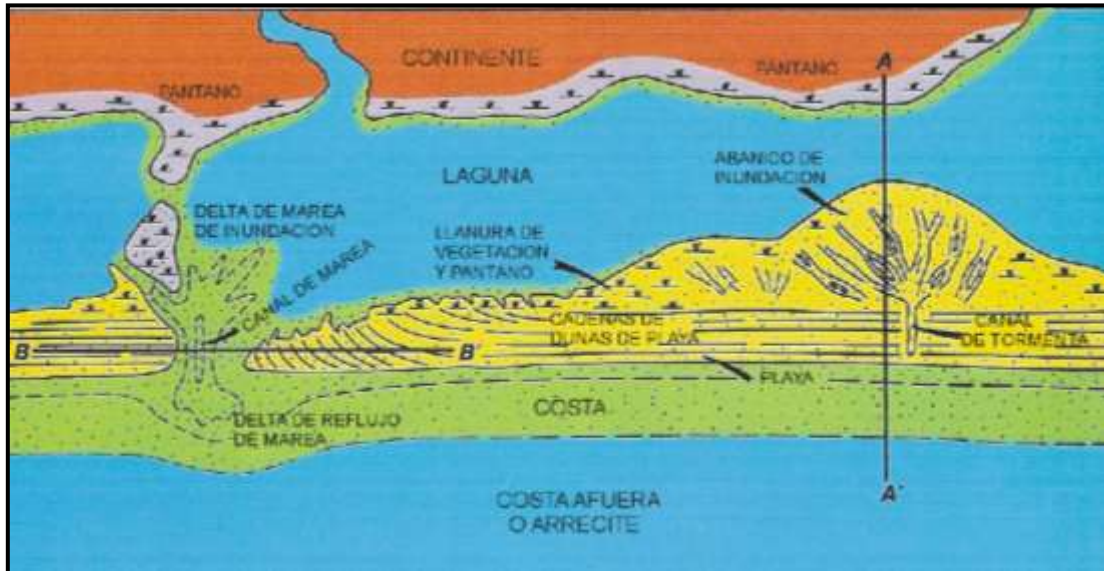


Figura 3. Ambiente sedimentario lagunar y sus sub-ambientes. (Tomado de [5])

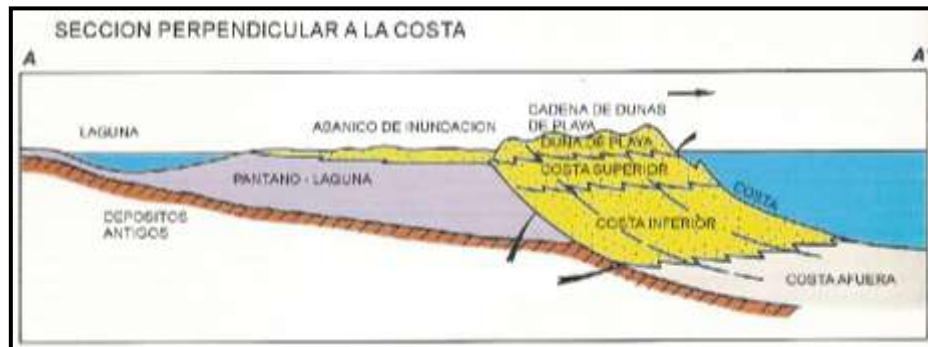


Figura 4. Distribución de facies en un corte perpendicular a la costa. (Tomado de [5])

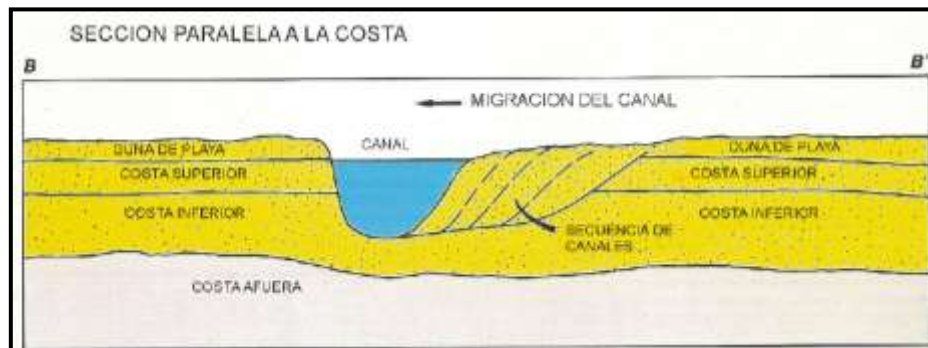


Figura 5. Distribución de facies en un corte paralelo a la costa. (Tomado de [5])

La laguna de canal angosto, es generalmente de forma elíptica, que se comunica con el mar a través de sólo un canal, el cual regula la entrada de las corrientes a la laguna y disminuye las fluctuaciones del nivel del agua. En zonas áridas o semi-áridas suelen ser hipersalinas por períodos de tiempo o permanentemente ^[6], la Laguna La Reina, la cual es nuestro objeto de estudio, puede clasificarse como este tipo de laguna.

Las lagunas restringidas, suelen ser largos cuerpos de agua orientados paralelamente a la costa, y presentan dos o más entradas de agua de mar por canales. Están directamente influenciadas por el viento, y presentan salinidades que van desde salobre hasta ser semejantes al agua del mar. Las lagunas de múltiples salidas, están caracterizadas por presentar numerosos canales anchos, que permiten el intercambio constante de agua de mar a la laguna, por las corrientes y las mareas, y poseen salinidades similares al agua de mar ^[6].

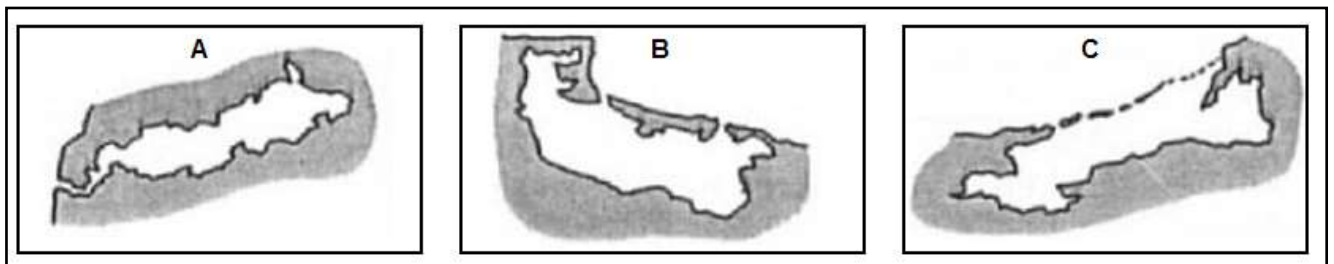


Figura 6. Tipos de lagunas costeras según su geomorfología. A: de canal angosto, B: restringida, C: de múltiples salidas. (Modificado de [6]).

3.2. Lagunas costeras en Venezuela

En Venezuela, se encuentran distribuidas a lo largo de las costas una variedad de lagunas costeras, teniendo como sistema principal, el complejo lagunar Tacarigua-Unare-Píritu, siendo éstas, las tres lagunas más grandes del país con características estuarinas. De igual forma se encuentran otras lagunas en diversas zonas de la costa, hacia el Golfo de Venezuela, en la Península de La Guajira, se encuentra la Laguna de Cocineta. En la región Centro-Oriental se encuentran tres lagunas costeras pequeñas, Las Salinas, Laguna Grande y la Laguna La Reina. También en la Isla de Margarita, existen dos lagunas, Las Maritas y La Restinga, siendo éstas, hipersalinas^[8].

Esta variedad de ambientes entre las lagunas litorales y los humedales, tanto continentales como insulares y se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Lagunas costeras y humedales venezolanos. (Tomado de [9]).

#	CONTINENTALES	#	INSULARES
1.	Franja marino-costera de la Reserva Forestal de Imataca	1.	Laguna de Gasparico
2.	Delta del Río Orinoco	2.	Laguna de Morro de Porlamar
3.	Planicie deltaica del Río San Juan	3.	Laguna de Las Marites
4.	Franja costera noroccidental del Golfo de Paria	4.	Laguna de Los Mártires
5.	Laguna de Chacopata y áreas bajas adyacentes	5.	Laguna de Punta de Mangle
6.	Laguna Grande de Obispo	6.	Laguna de Punta de Piedras
7.	Laguna de Campoma	7.	Laguna de Raya
8.	Laguna de Punta Delgada	8.	Laguna Boca de Palo
9.	Laguna de Los Patos	9.	Laguna de La Restinga
10.	Laguna de Piritu	10.	Laguna de Boca de Río
11.	Laguna de Unare	11.	Laguna de Boca Chica
12.	Laguna de Tacarigua		
13.	Franja marino-costera del sector Higuero-Cabo Codera		
14.	Laguna de Patanemo		
15.	Zona deltaica del Río Yaracuy		
16.	Golfete de Cuare		
17.	Sector costero Boca de Tocuyo San Juan de Los Cayos		
18.	Humedales de Boca de Hueque y las Salinas de Sauca		
19.	Desembocadura del Río Ricoa		
20.	Áreas marino-costeras adyacentes al Istmo de los Médanos		
21.	Laguna de Boca de Caño-Tirava		
22.	Golfete de Coro		
23.	Ciénaga de Los Olivitos		
24.	Laguna de las Peonías		
25.	Ciénagas de El Gran Encal y de Caimare Chico		
26.	Laguna de Cocinetas		

Las 16 principales lagunas del país, ubicadas en la figura 7, se presentan en la tabla 2, junto con sus características, entre las que se destacan el área, la presencia de manglares, el aporte de agua dulce, el clima representado por la temperatura y pluviosidad promedio, la batimetría de la laguna y las condiciones del agua como lo son el rango de temperaturas y salinidad, mínimas y máximas y la turbidez ^[8].

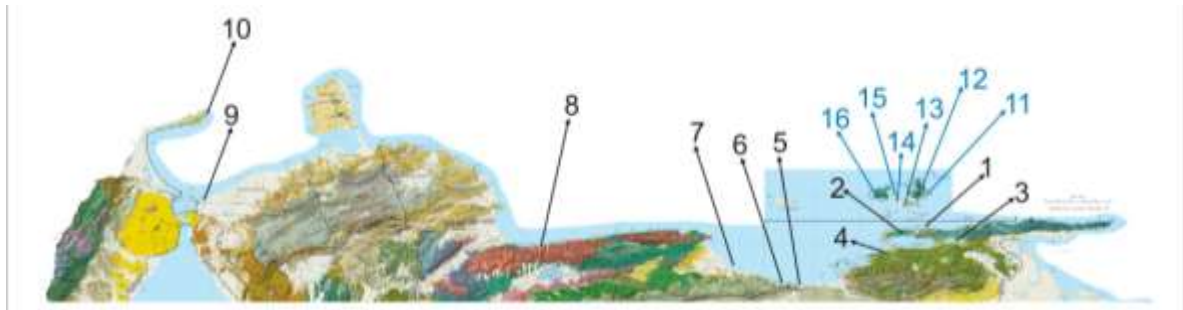


Figura 7. Ubicación de las principales lagunas costeras en Venezuela. (Modificado de [10]).

Tabla 2. Características generales de las principales lagunas de Venezuela. (Tomado de [9]).

#	LAGUNA	Área (ha.)	Manglares	Aporte de agua dulce	CLIMA		LAGUNA	BOCA	AGUA		
					Temperatura Promedio (°C)	Pluviosidad Promedio Anual (mm)			Temperatura Mínima / Máxima (°C)	Salinidad Mínima / Máxima (0/00)	Turbidez (m)
1.	Laguna de Chacopata	700	Si	ocasional	27.3	317	0.9	—/3	25 a 31	36 a 46	0.75
2.	Laguna Grande de Obispo	320	Si	ocasional	28.0	300	0 a 30	500/39	20 a 28	36 a 37	—
3.	Laguna de Campoma	800	No	constante	—	0 a 214	0 a 2	—/3	26 a 32	0.1 a 0.4	—
4.	Laguna de Los Patos	150	Si	ocasional	27.0	3.5 a 70	0 a 1	6/0.3	25 a 34	0.4 a 40	0.94
5.	Laguna de Píritu	2.600	Si	por un canal	—	700	0.2	200/3.5	26 a 32	23 a 72	—
6.	Laguna de Unare	4.750	No	constante	—	703	0.8	—/1.1	24 a 37	0.05 a 92	—
7.	Laguna de Tacarigua	12.500	Si	constante	26.5	1.270	0.8	—/1	24 a 33	2 a 43	—
8.	Laguna de Patanemo	100	Si	ocasional	27.5	0 a 125	1.5	250/5	26 a 32	34 a 48	—
9.	Ciénaga de los Olivitos	33.000	Si	ocasional	27.0	350 a 500	—	—	—	—	—
10.	Laguna de Cocinetas	1.000	Si	ocasional	—	277	2.3	—/8	27 a 31	36 a 44	—
11.	Laguna del Morro de Porlamar	127	Si	ocasional	28.0	262 a 337	0.5	30/3	27 a 31	37 a 53	—
12.	Laguna de Las Maritas	2.000	Si	ocasional	28.0	262 a 337	0 a 5	—/9	25 a 31	36 a 43	—
13.	Laguna de Punta de Piedras	76	Si	ocasional	28.0	262 a 337	0.5 a 2.4	25/2.4	24 a 30	29 a 42	—
14.	Laguna de Raya	56	Si	ocasional	28.0	262 a 337	0.9	200/0.9	26 a 32	35 a 47	—
15.	Laguna de La Restinga	16.000	Si	ocasional	28.0	262 a 337	6	—/5.6	27 a 36	37 a 92	—
16.	Laguna de Boca Chica	25	No	ocasional	28.0	262 a 337	4	—	27 a 36	40 a 320	—

Muchos estudios se han realizado en los sistemas lagunares en Venezuela, con diferentes fines, por ejemplo, ambientales, ecológicos, geológicos, geomorfológicos entre otros, evaluando las condiciones actuales y pasadas de cada ambiente, siendo de interés los trabajos realizados, en donde se ha determinado la evolución de las lagunas costeras a través del estudio paleoambiental y las características geomorfológicas del sistema.

En el sistema de la Laguna de Tacarigua ubicada en el Estado Miranda, se llevó a cabo un estudio paleoambiental y de evolución, a través del análisis de polen fósil contenido en los sedimentos holocenos, teniendo como resultados que antiguamente la zona estuvo inundada por el mar formando un medio ambiente marino y lagunar y que por procesos de sedimentación, paso a hacer un ambiente terrestre con vegetación boscosa, presentando durante su evolución, fluctuaciones del nivel marino y variaciones del clima en cuanto a la intensidad en las lluvias, controlando la vegetación presente, tanto de bosques de manglares como de vegetación terrestre, estando estas evidencias en el registro sedimentario al presentar estratos oscuros de materia orgánica ^[11].

En la misma, Laguna de Tacarigua, se determinó que una vez que la velocidad de ascenso del nivel del mar se redujo, se inició un proceso de progradación continental, producido por una gran cantidad de aporte de sedimentos transportados por los ríos de la Cordillera de la Costa hacia el mar, en donde las corrientes y mareas junto con el oleaje de la zona, se redistribuyeron a lo largo de la costa. Este ambiente está controlado por el clima, donde en época de lluvia los procesos continentales predominan sobre el impacto marino costero, y durante la sequia se invierten, originando deltas de flujos que son el resultados de la introducción de sedimentos marinos dentro de la laguna a través de canales de marea ^[12].

En la laguna de Unare ubicada en el Estado Anzoategui, se determinó la evolución de la misma, mediante el análisis de núcleos de sedimentos con atención

especial a estratos de paleosuelos lagunares y la datación de los mismos con ^{14}C (carbono 14). La presencia de estos niveles orgánicos, demuestran la existencia de antiguos fondos de laguna en los puntos de muestreo, mostrados en la figura 8, en donde se presentan los registros sedimentarios obtenidos en cada lugar, con sus respectivas edades determinadas. Teniendo evidencias de que hace 4340 ± 40 AP, el mar llegaba a estar aproximadamente 5 Km hacia el continente tomando como referencia la línea del mar actual, ya que se consiguió un paleosuelo de manglar en la localidad de San Juan. Con este y otros datos, se determinó que durante la Transgresión Flandriense, toda la zona desde Puerto Píritu hasta Boca de Uchire estaba formada por una gran bahía ^[13].

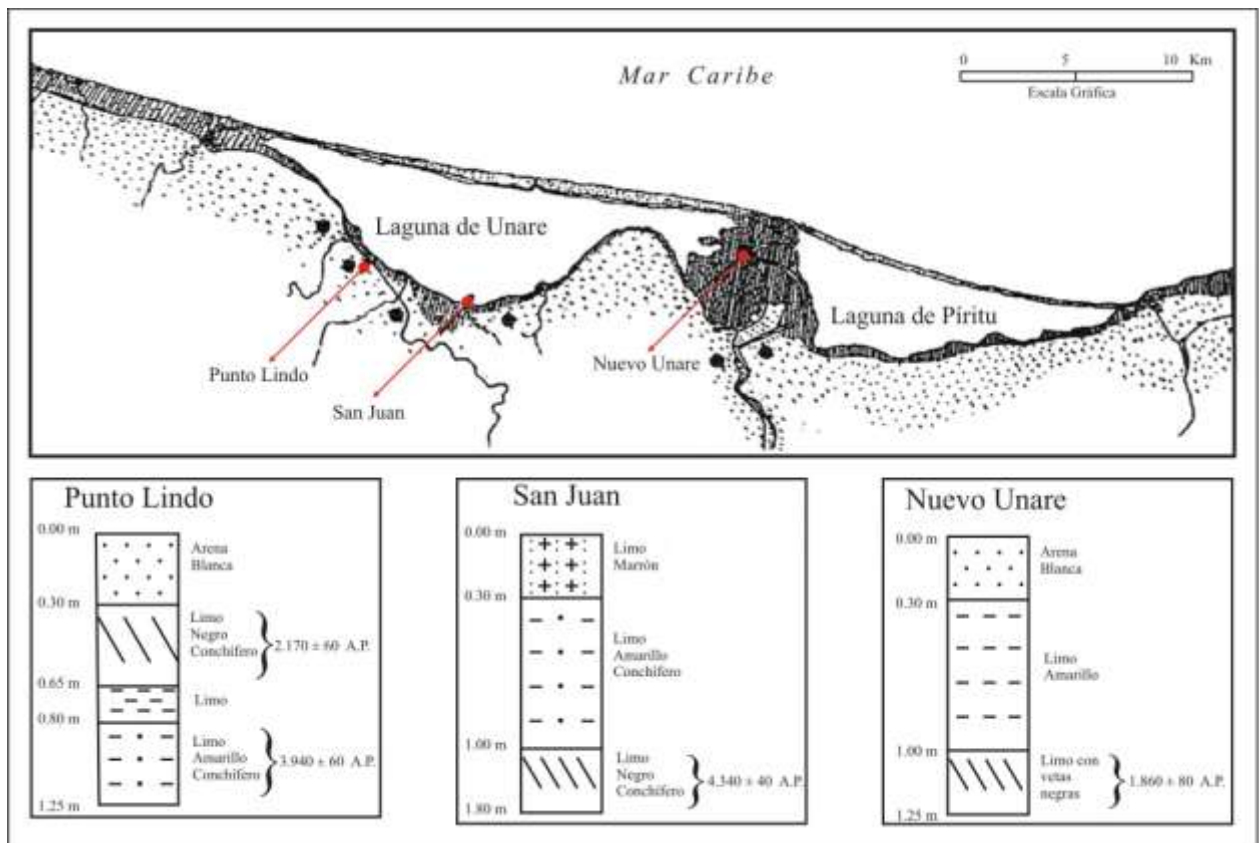


Figura 8. Estudio en la Laguna de Unare y registros sedimentarios. (Modificado de [13]).

En el complejo sedimentario de isla de barrera y la laguna litoral de la Salina de Sauca en el Estado Falcón, se llevó a cabo un estudio de los ambientes sedimentarios presentes y la evolución geomorfológica del sistema. Haciendo énfasis en la planicie lagunar, por ser la de mayor extensión, que debido al aporte continuo de sedimentos clásticos terrígenos a la paleolaguna, a través de la escorrentía superficial de las colinas que circundan al sistema y la restringida comunicación de esta con el mar, favorecieron los procesos de depositación, generando la colmatación total del medio lagunar, formándose una planicie costera, que se inunda parcialmente solo en época de lluvias^[14].

Se determinó que la planicie lagunar está constituida por sedimentos clásticos finos de origen terrígeno con rangos granulométricos de limo medio a arcilla y arenas, con abundante material biogénico, aportado al sistema por la escorrentía superficial y la abundancia de minerales evaporíticos depende de los suaves desniveles dentro de la superficie de la planicie lagunar, concentrándolos en zonas específicas^[14].

La evolución geomorfológica de este sistema lagunar esta igualmente controlada por la Transgresión Flandriense, donde el aporte de sedimentos al sistema dieron origen a la isla de barrera en sentido Oeste-Este protegiendo la laguna del impacto marino, seguida de la progradación continental debido a los aportes terrígenos de origen fluvial, depositados en una laguna litoral somera de baja energía que evolucionó a una planicie costera, en la cual actualmente se depositan minerales evaporíticos y eólicos, bajo condiciones climáticas semi-áridas^[14].

Estos y otros trabajos, permiten tener una visión regional de las características de los sistemas lagunares en las costas venezolanas, resaltando la alta influencia que tienen sobre estos sistemas las corrientes y las mareas de las masas de agua que

circundan estos ambientes, al igual que la importancia que tienen los ecosistemas de manglares en las lagunas costeras.

3.3. El Holoceno en Venezuela

La Transgresión Flandriense del Holoceno inicia entre 16 y 15 ka BP (mil años antes del presente), ya iniciada la transgresión a los 14 ka BP, se calcula que las áreas glaciales se encontraban cubiertas por hielo en un 88%, posteriormente a 10 ka BP, ese porcentaje bajo a 50%, para finalmente en 6,5 ka BP ocurrió la última etapa importante de fusión de los hielos ^[15].

La sedimentación del Holoceno en Venezuela, desarrollada hace 11,5 ka BP comprende una alta variedad de ambientes sedimentarios que se han mantenido con la transgresión marina en las líneas de costa, plataformas continentales, regiones insulares y todas las áreas continentales. En el tramo de Cabo Codera a Puerto La Cruz, en el cual se encuentra la planicie lagunar de estudio, la plataforma marina es muy amplia y somera con una alta sedimentación en la línea de costa, por la carga de sedimentos transportados por el río Unare y el río Tuy principalmente, formando uno de los sistemas lagunares más importantes del país como lo son las lagunas de Unare y Píritu en el Estado Anzoátegui y la laguna de Tacarigua en el Estado Miranda, respectivamente ^[15].

La comprensión de los cambios, en los ambientes costeros requiere el conocimiento de los niveles relativos del mar, por ello se llevo a cabo el desarrollo de una curva de nivel del mar durante el Holoceno, en las costas venezolanas, se agruparon datos obtenidos de corales enterrados y sedimentos de manglares, ya que estos paleoindicadores son los más adecuados para registrar los niveles del mar del pasado, y se obtuvo una primera aproximación del nivel del mar mostrada en la figura 9, muy similar a otras áreas de Caribe, mas sin embargo se requiere una mayor cantidad

de datos para evaluar la componente natural del mar y realizar predicciones futuras del comportamiento del mismo ^[16].

De la curva del nivel del mar en Venezuela durante la Transgresión del Holoceno, se tiene que alrededor de 8 ka BP el nivel del mar se encontraba 15 m por debajo del actual, luego entre 8 y 6 ka BP el nivel asciende rápidamente con una tasa de incremento de 0,5 cm/año. Posteriormente el ascenso del nivel del mar es moderado. Entre 6 y 4 ka BP la velocidad promedio de incremento del nivel del mar fue de 0,025 cm/año, mucho más baja que la velocidad anterior ^{[15] [16]}.

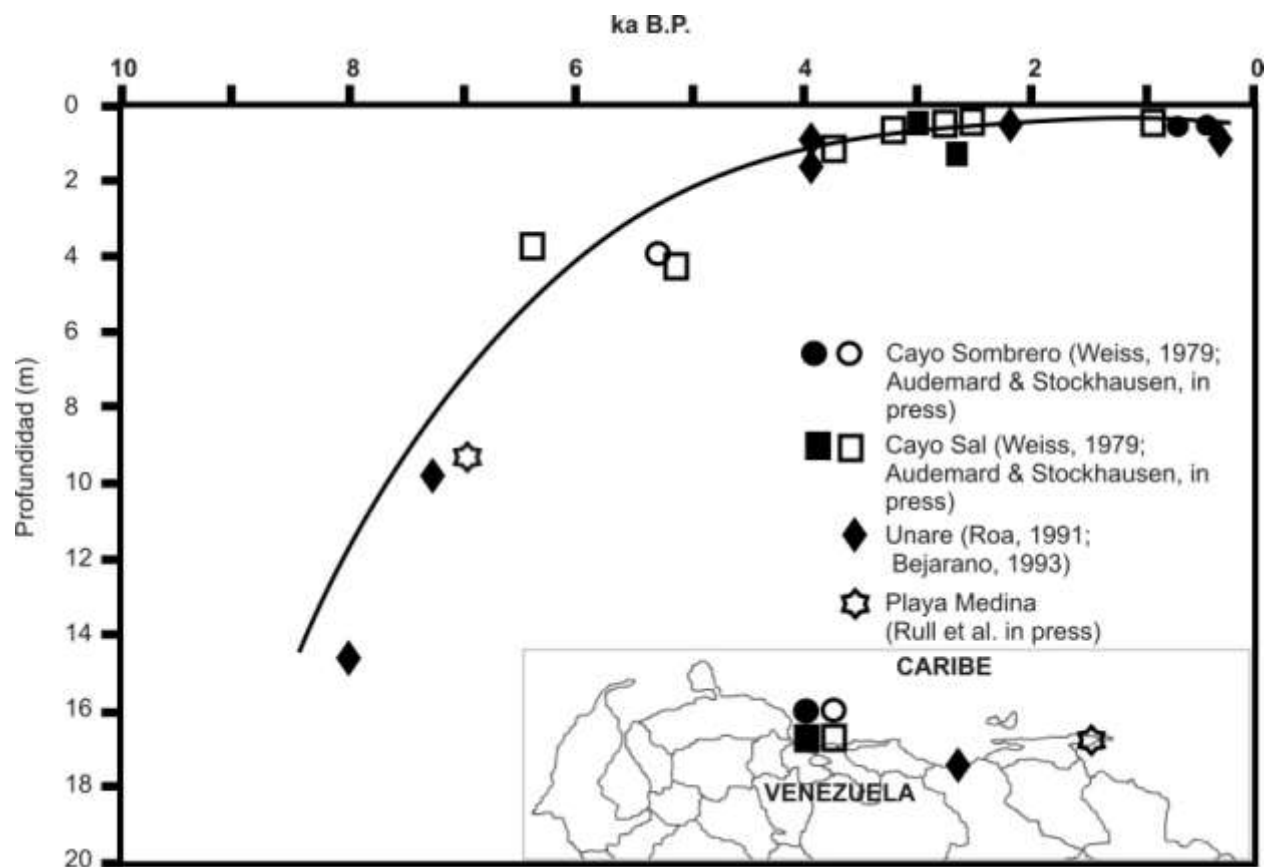


Figura 9. Variación del nivel del mar en las Costas Venezolanas durante el Holoceno. (Símbolos negros, sedimentos de manglares y símbolos blancos, corales). (Tomado de [16]).

3.4. Corrientes y mareas en la Costa Oriental de Venezuela

El estudio de ambientes marino-costeros requiere contemplar la dinámica de los cuerpos de aguas circundantes, ya que al considerar el sistema en general, el impacto que pueda generar las corrientes y mareas, puede en alguna medida estar controlando el ambiente de interés. Por lo tanto tener conocimiento de estos factores brinda un aporte a la integración de las condiciones actuales y paleoambientales presentes en la zona de estudio.

La costa oriental del Estado Miranda está en contacto con el cuerpo de agua marino denominado, Golfo de Cariaco, el cual tiene su origen casi exclusivamente marino, ya que la contribución de agua dulce por descargas de ríos y precipitación, es muy pequeña. La dinámica que presenta este cuerpo de agua, durante casi todo el año, está controlada principalmente por los vientos alisios que arrastran hacia el Oeste a las aguas superficiales del Golfo, acumulándose las aguas cerca de la boca para luego salir hacia el Caribe ^[17].

La distribución de las propiedades del agua, las mediciones directas de la velocidad y la dirección de las corrientes en el interior del Golfo, indicaron la existencia de una circulación cuasi-horizontal ciclónica y casi permanente de las masas de agua superficiales. Las observaciones de corriente señalan que en la mayor parte del Golfo, el flujo de las aguas de las capas superiores se dirige hacia el Oeste, con velocidades máximas cerca de la Costa de la Península de Araya de más de 0,7 nudos (0,36 m/s) y velocidades mínimas, en el centro y sur del Golfo en los extremos oriental y occidental del orden de 0,1 nudos (0,05 m/s). Las corrientes que se dirigen hacia el Este, son las que complementan el giro ciclónico, se circunscriben a una porción relativamente pequeña de la mitad Sur del Golfo, y su velocidad no sobrepasa los 0,3 nudos (0,15 m/s) ^[17].

En el interior del Golfo, las mareas son de pequeña amplitud, debido a la presencia de un punto anfidrómico, que es el punto alrededor del cual se produce la rotación de las cotidales, anulando la amplitud de la marea por la ausencia de efectos de resonancia de las ondas, generando que la superficie del mar permanezca inmóvil. Estas pequeñas oscilaciones del nivel de las aguas, origina corrientes de mareas de poca importancia en comparación con el movimiento general, circulación e intercambio de las masas de agua en el Golfo, las cuales están controladas casi completamente por el efecto de los vientos ^[17].

Las corrientes medidas en la costa oriental del Estado Miranda entre Higuerote y Carenero, se ven influenciadas por las mareas, cambiando las direcciones y velocidades en el transcurso del día, según los resultados obtenidos de las mediciones de las corrientes superficiales durante el año 2000 con un intervalo bimensual ^[18].

Teniendo que las velocidades a lo largo del año oscilan entre 0,4 m/s y 0,6 m/s, y la dirección se comporta en patrones que corresponden claramente a corrientes de marea, notándose que a medida que transcurre el año, hay un desplazamiento en las corrientes del sistema rotando en sentido horario a medida que avanza la estación de vientos alisios débiles y se incrementa la pluviosidad, observándose especialmente este comportamiento durante los meses de junio, agosto y octubre del 2000 ^[18]. Esta información brinda un aporte importante para comprender aun mejor la dinámica marina actual que está controlando el sistema lagunar activo de la zona de estudio.

En la figura 10, se muestran las direcciones de las corrientes en el Golfo de Cariaco, junto con las velocidades determinadas en cada sentido. Al igual se muestran la zona de estudio con las velocidades medidas durante el año 2000.

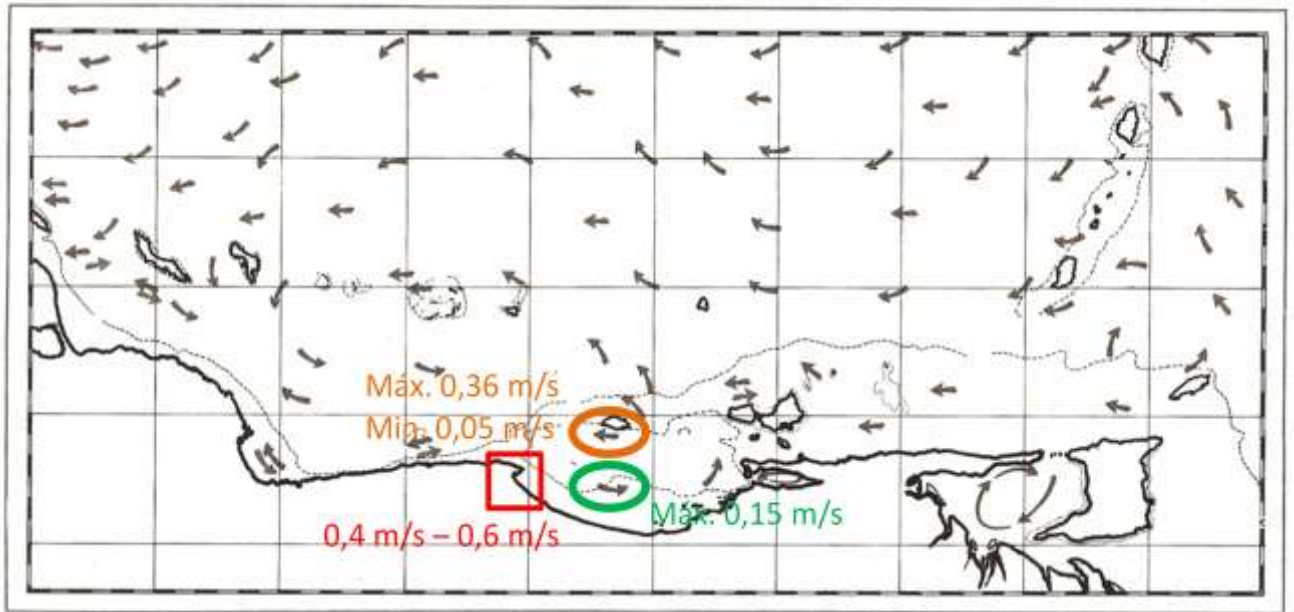


Figura 10. Velocidades y direcciones de la corriente marina en el Golfo de Cariaco. (Modificado de [17]). Presentando los datos extraídos de [17] y [18]

3.5. Ecosistemas de manglares

Para evaluar los sistemas lagunares tanto del actuales como del pasado, en cuanto a las condiciones ambientales que están presentes, se cuenta con los bosques de manglares, un interesante ecosistema el cual permite el monitoreo de las condiciones fisicoquímicas a las cuales se encuentra la laguna, ya que estos organismos vivos, tienen un rápido tiempo de respuesta frente a cambios ambientales, permitiendo evaluar las características presentes en un momento determinado.

Los manglares corresponden a la vegetación arbórea de la zona de mareas que correspondiente a los ambientes marinos y terrestres, pudiendo crecer a diferentes salinidades. Poseen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten ocupar hábitats bajo condiciones especiales, suelos desde limosos a arenosos, con bajas concentraciones de oxígeno, en ambientes salinos y salobres. Al igual que han

desarrollado estrategias reproductivas donde los frutos germinan en la planta madre, un sistema de raíces aéreas llamadas pneumatóforos para la captura de oxígeno atmosférico y glándulas en las hojas que le permiten secretar el exceso de sal ^[19].

Geográficamente, los manglares se distribuyen según el control climático y fisiográfico de la costa, donde su expansión está influenciada por el intervalo de las mareas. Los manglares y los complejos lagunares estuarinos son ecosistemas abiertos, ya que requieren el aporte de agua dulce por ríos, arroyos y mantos freáticos, así como el aporte de agua marina ^[19].

Una de las características más importantes que poseen los manglares es su capacidad de adaptación a condiciones específicas de periodicidad de inundación y exposición al aire, determinando la distribución y zonación en la costa, ya que para cada especie los requerimientos medio ambientales, fisicoquímicos del agua y del sustrato en donde crecen son diferentes ^[19].

Estos factores son una combinación de las mareas, aportes de nutrientes por medios fluviales, escurrimientos terrestres, precipitación-evaporación, efecto del viento, profundidad y geomorfología del cuerpo de agua adyacente, tasa de sedimentación, tasa de subsidencia, la extensión del nivel topográfico óptimo y la composición del sedimento. Así mismo parámetros ambientales como son temperatura, corrientes, salinidad del agua, pH, redox del agua intersticial y composición del sustrato ^[19].

Las especies de manglares se distribuyen comúnmente en bandas paralelas a la línea de costa, y entre ellas están:

Rhizophora mangle: se encuentra en las condiciones de mayor inmersión del suelo y de menor salinidad (0 a 37 ppm, con tolerancia hasta 65 ppm), considerándose como una especie pionera en los límites terrestres y marinos. Esta especie presenta un mecanismo de exclusión de las sales, así como lenticelas en las raíces adventicias para

captar el oxígeno atmosférico. Se desarrolla en las desembocaduras de ríos donde se forman lagunas someras con aguas salobres sujetas a la actividad de las mareas ^[19].

Laguncularia racemosa: se encuentra en las condiciones de mayor inmersión del suelo, tiempo de residencia del agua y de menor salinidad (0 a 42 ppm, con tolerancia hasta 80 ppm). Esta especie presenta mecanismo de excreción de las sales, así como lenticelas en sus neumatóforos para captar el oxígeno atmosférico ^[19].

Avicennia germinans: se encuentra en las condiciones de menor inmersión del suelo, solo en las mareas más altas y de mayor salinidad (0 a 65 ppm, con límites de tolerancia hasta 100 ppm). Esta especie presenta mecanismo de excreción, exclusión y acumulación de las sales, así como lenticelas en sus neumatóforos para captar el oxígeno atmosférico ^[19].

Durante el Cuaternario Tardío, comenzó el aumento del nivel del mar produciendo la migración hacia tierra firme de varias facies sedimentarias en las costas de América. Donde una de las evidencias más impresionantes de esas migraciones fue el retiro y la invasión de manglares, tierra adentro. La distribución y composición actual de los bosques de manglares es el resultado de ese aumento reciente en el nivel del mar ^[20].

Actualmente en Venezuela, los manglares presentan una distribución irregular a lo largo de la costa, debido a la heterogenidad de las mismas, en términos de los requerimientos de cada especie. Ocupan casi un 35% que representa 1.100 km de los 4.006 km de litoral, cubriendo una extensión de 250.000 ha aproximadamente. De acuerdo a cada sector de las costas, se desarrollan los bosques de manglares, resumiéndose en dos grandes tipos geomorfológicos costeros, como lo son, las planicies aluviales y las lagunas costeras, siendo de importante interés ya que crecen en suelos ácidos, de textura arenosa (tropofibrists) con altas concentraciones de materia orgánica ^[20].

Cada sector de manglar de las costas venezolanas tiene características propias, todos los sectores donde se desarrollan manglares, se reducen a dos grandes tipos geomorfológicos costeros: planicies aluviales y lagunas costeras. Donde fundamentalmente se encuentran las especies: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa* (mangles rojos); *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana* (mangles negros); *Laguncularia racemosa* (mangles blancos), y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) ^[20].

A escala local se tiene, que la influencia de las mareas puede ser determinada con la información extraída en campo a través de los bosques de manglares, que por ser árboles tropicales costeros capaces de colonizar terrenos anegadizos tolerando altos niveles de salinidad, brindan un valioso aporte para la reconstrucción paleoambiental.

Siendo más específicos, la observación, identificación y medida de las raíces (neumatóforos) de los manglares de la especie *Avicennia germinans* (mangle negro), indican períodos de inundación por las mareas, ya que al poseer geotropismo negativo, el crecimiento de la misma es hacia arriba ^[21].

Estos neumatóforos, son tallos verticales que despuntan a través del fango, están empalmados con raíces horizontales que sirven igualmente para anclar al árbol en el fango móvil, estos tubos protegidos, poseen orificios que se abren con la marea baja para permitir la respiración y se cierran con la marea alta con la presión del agua y crecen súbitamente ante eventos de inundación ^[21].

Al conocer y diferenciar cada especie de manglar, se puede tener información muy interesante tanto de las condiciones fisicoquímicas del ambiente actual, como de las que existieron en el sistema paleolagunar.

3.6. Geología Regional

El sistema lagunar de Higuerote se encuentra dentro de la Cuenca de Barlovento, la cual constituye una unidad sedimentaria deprimida, que está limitada en su parte septentrional por la Cordillera de la Costa y en su parte meridional por la Serranía del Interior en la figura 11. El modelo genético propuesto para la Cuenca de Barlovento es el de una cuenca semi-graben, perteneciente a la parte occidental del Graben de la Ensenada de Barcelona ^[22].

La evolución geológica de la Cuenca de Barlovento en la figura 12, comienza en el Mioceno Medio, al depositarse las facies sedimentarias de agua dulce y salobre pertenecientes a la Formación Aramina, discordante sobre las rocas metamórficas Pre-Oligocenas de la Cordillera de la Costa. Luego se produjeron una serie de movimientos verticales, Pre-Pliocenos, dando como resultado un basculamiento de los sedimentos recién depositados hacia el sur ^[22].

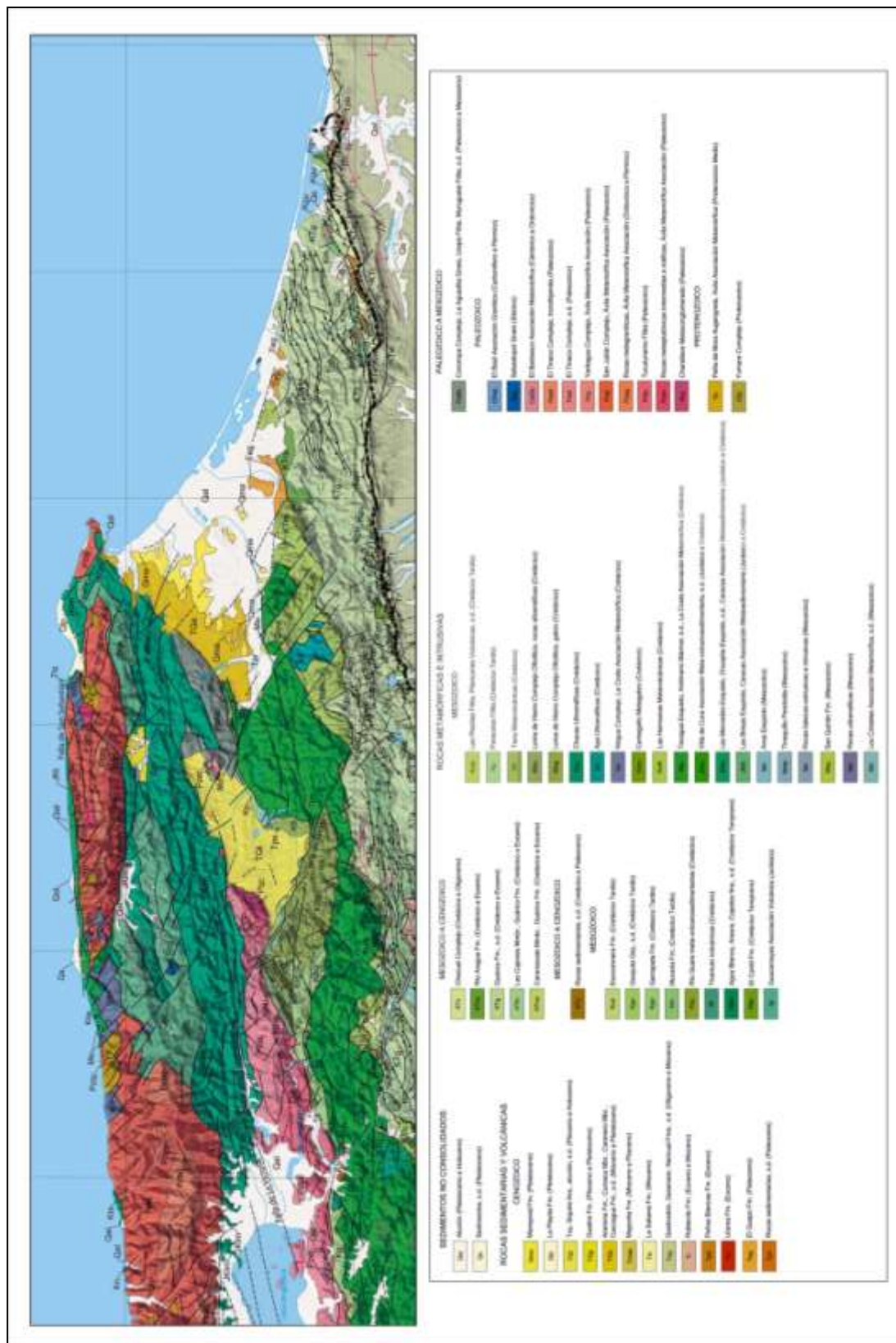
Más tarde, en el Mioceno Tardío, la región nor-central de Venezuela, sufrió una etapa tectónica extensiva, dando como resultado una deformación de carácter frágil, generando a su vez el graben de la Ensenada de Barcelona, y de igual forma la apretura de la Cuenca de Barlovento al occidente de este graben, mientras se depositaba la Formación Cumaca durante el Mioceno Medio-Tardío, provocando además que ocurriera un avance significativo en la línea de costa, generando un retroceso del mar en la región de Barlovento ^[22].

A medida que el graben de la ensenada de Barcelona se profundiza, la Cuenca de Barlovento sufre un proceso de subsidencia, permitiendo que la línea de costa avance hacia la plataforma de Barlovento, teniéndose entonces un ambiente de deposición marino somera, en el marco en el cual se continuaron depositando las facies correspondientes a la Formación Aramina, durante todo el Plioceno ^[22].

Luego en el Plioceno Tardío, el régimen tectónico, experimenta un cambio en su configuración, provocando un levantamiento progresivo de la Cuenca de Barlovento de Oeste a Este, generando que la línea de costa retrocediera progresivamente. En esta nueva fase tectónica las fallas preexistentes de la primera fase de deformación fueron reactivadas por la transtensión del sistema de fallas de La Victoria ^[22].

Seguido del retiro del mar, la cuenca fue basculada hacia el sur nuevamente, quedando expuesta a procesos erosivos, y donde el ambiente de depositación predominante es continental durante el Pleistoceno Temprano, depositándose los sedimentos correspondientes a la Formación Caucaagua. Seguidos de la depositación de los sedimentos pertenecientes a la Formación Mamporal durante el Pleistoceno Medio ^[22].

Posteriormente durante el Cuaternario Tardío, ocurrieron una serie de deslizamientos tipo slumping en la parte central de la cuenca, teniendo como superficie de despegue las lutitas pertenecientes a las Formaciones Caucaagua y Mamporal, quedando la región septentrional de la Cuenca de Barlovento más expuesta a procesos erosivos que la región meridional, este evento se extiende hasta el Reciente. Debido a evidencias geomorfológicas, tectónicas y sísmicas, se puede decir que la Cuenca de Barlovento aun presenta actividad tectónica ^[22].



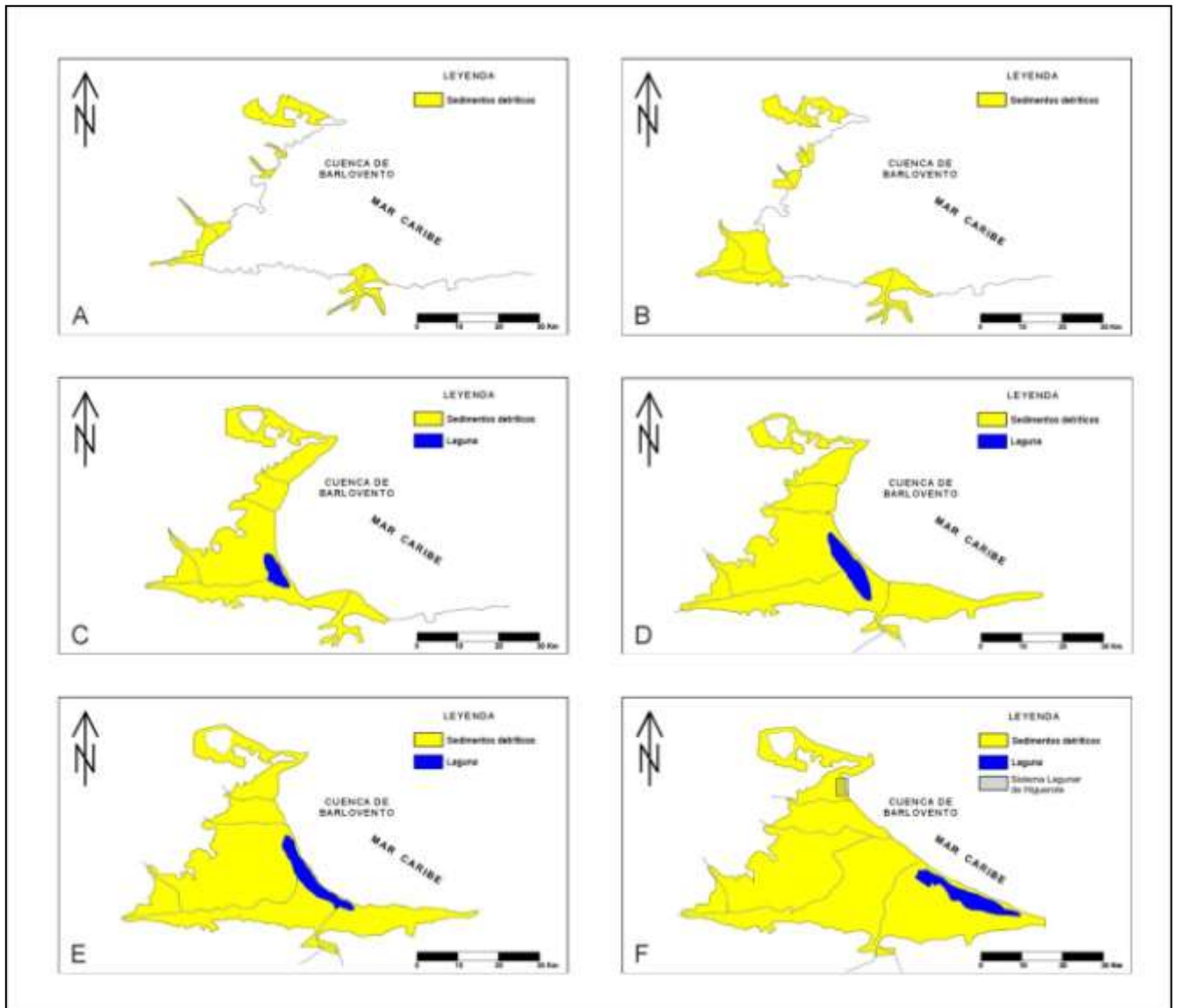


Figura 12. Evolución de la Cuenca de Barlovento. (Modificado de [22]).

Donde se pueden observar los cambios ocurridos durante:

A: Mioceno Medio; B: Mioceno Medio-Tardío; C: Plioceno Temprano-Medio; D: Plioceno Tardío; E: Pleistoceno Temprano-Tardío; F: Holoceno. Observándose además, la ubicación actual del sistema Lagunar de Higuero en la Cuenca de Barlovento.

3.7. Actividad Sísmica Local

Para una interpretación del impacto de la sismicidad en la evolución sedimentaria del sistema lagunar de Higerote, es necesario conocer los sismos que han sido registrados en los últimos años. De los registros de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) ^[23], se tiene que en el año 1900, ocurrió un sismo en el cual algunas edificaciones en la ciudad de Higerote resultaron destruidas al igual que la línea de ferrocarril de Carenero, ocasionando la muerte de varias personas y dejando muchos heridos.

Luego, el 14 de abril del año 1930 a las 3:40 am, ocurrió un temblor en Higerote. Otro registro, indica que el día 08 de agosto del año 1933 a las 3:30 pm ocurrió un fuerte temblor igualmente en Higerote. Durante el primer sábado o domingo del mes de septiembre del año 1981, se sintió un temblor de regular intensidad en Higerote, según testigos presenciales. De todos estos sismos nombrados anteriormente no se poseen datos específicos de la magnitud del sismo y la ubicación geográfica del epicentro, por lo que se definen sismos históricos, pero de ellos se estima que pudieran haber sido de una magnitud de onda superficial entre 3,5 a 4 y una intensidad similar a los sismos registrados más recientes.

Posteriormente el día 24 de mayo del año 1989, ocurrió un sismo en Higerote del que se tienen datos específicos, obtenidos de dos fuentes, según datos del Listado Instrumental del International Seismological Centre 1900-1994, el sismo ocurrió a las 01:22:11, con una magnitud de 3,8 y el epicentro ubicado en las coordenadas 11,06° N y 65,09° W, con una profundidad focal de 48 Km, por otra parte, según los datos de FUNVISIS, éste sismo ocurrió a las 01:22:08, con una magnitud de onda superficial de 4,5 estando ubicado el epicentro en las coordenadas 11,08° N y 65,07° W.

Recientemente el día 30 de mayo del 2009, se registró un sismo a 48 Km al Noreste de Higuero, con una magnitud de onda superficial de 3,5 y una profundidad de 5 Km, reportado por FUNVISIS.

Las evidencias sísmicas en la región de Higuero, que se resumen en la tabla 3, son el reflejo del contexto geodinámico en el que se encuentra Venezuela, ocasionado por la interacción del movimiento de la Placa Caribe hacia el Este con respecto a la Placa Suramericana. Además los 4 sismos más recientes de magnitud conocida, se presentan en la figura 13.

Tabla 3. Registros Sísmicos en la Región de Higuero (Modificado de [23]).

Año	Fecha	Hora	Lugar	Comentarios
1812			Cayapa	Iglesia dislocada
1812			Curiepe	Afectada la iglesia del pueblo
1812			Mamporal	Pocos daños sobre las casas
1812	13/10	10pm/11pm	Arenales	Sismos consecutivos
1866	01/03	10:30pm	Caucagua	Fuerte temblor
1866	01/03 y 02/03	Noche	Curiepe	Diez temblores por las cercanías
1866	02/03	2:05am	Curiepe	Dos temblores
1866	02/03	2:09am	Curiepe	Dos temblores
1869	07/10	5:00pm	Río Chico y Capaya	Fuerte temblor
1979	02/02	Noche	Curiepe	Varios temblores
1879	07/03	7:15pm	Curiepe	Se arruinaron varias casas
1888	13/11	4:40am	Río Chico	Fuerte temblor
1900	29/10	4:42am	Higuero, Río Chico, Carenero, Tacarigua y Curiepe	Casas destruidas, muertos y heridos
1929	17/02		Caucagua	Temblores un mes después del terremoto de Cumaná
1930	14/04	3:40 am	Higuero	Temblor
1933	08/08	3:30 pm	Higuero y Capaya	Fuerte temblor
1981	/09		Higuero	Temblor de regular intensidad
1988	26/09	3:54am	Barlovento	Magnitud: 4.6. Hipocentro de 8Km a 11Km
1989	24/05	01:22:11am	Higuero	Magnitud: 3.8. Epicentro: 11,06°N 65,09°W. Profundidad 48Km. Fuente: ISC. Sentido en todo el Estado Miranda
		01:22:08am	Higuero	Magnitud: 4.5. Epicentro: 11,08°N 65,07°W. Fuente: FUNVISIS
1997	10/07	10:58pm	Río Chico	Magnitud: 4.0. Epicentro a 6Km. Sentido en el Estado Miranda
2009	30/05	02:34am	Higuero	Magnitud: 3.5. Epicentro: 10,77°N 65,77°W. 48Km al Noreste de Higuero. Profundidad 5 Km.

así evaluar la actividad sísmica como un agente geodinámico y morfogenético. Al igual que realizar la estimación de los daños que estos ocasionan y prevenir futuras pérdidas materiales y de vidas humanas ^[25].

Tabla 4. Registros de Riesgos Geológicos para la Región de Higuerote (Modificado de [25]).

Año	Fecha	Localidad cercana más grande	Sitio natural o poblado	Naturaleza del Riesgo	Vínculo con la Sismicidad	Efectos del Riesgo
1900	29/10	Caucagua	Vía a Guatire	A1	Vínculo comprobado	
1900	29/10	Capaya	Entre Cutusiapón y Prim	B	Vínculo comprobado	
1900	29/10	Río Chico	Río San José	C	Vínculo comprobado	
1900	29/10	Río Chico	Paparo	B	Vínculo comprobado	Destrucción Puente de Hierro. Daños a viviendas. Parte del pueblo se hundió en el agua.
1900	29/10	Carenero / Río Chico	Vía férrea de Carenero / Río Chico	B y D	Vínculo comprobado	Vía férrea destruida. Rieles doblados.
1900	29/10	Capaya	NE Caserio La Maturetera	B	Vínculo comprobado	
1908		Higuerote	Río Capaya y Río Curiepe	A2	Ausencia de vínculo	
1909	/12	Higuerote	Río Capaya y Río Curiepe	A2	Ausencia de vínculo	
1967	29/07	Capaya	Las Morochas, cerca Río Agua Colorada	B	Vínculo comprobado	
1979	03/07	Caucagua	Chuspita	A2	Ausencia de vínculo	Puente dañado. Vía interrumpida
1979	24/09	Río Chico	Paparo	A2	Ausencia de vínculo	

Riesgos asociados a fenómenos gravitacionales:
A1: Deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas.
A2: Aludes de tierra y peñas; arrastes torrenciales.
Riesgos inherentes a vicios del suelo y/o subsuelo:
B: Fenómenos de licuefacción.

Riesgos asociados a desplazamientos bruscos de espejos de agua:
C: Derrames de ríos, lagos, embalses.
Deformaciones del suelo y cambios fisiográficos:
D: Rupturas de superficie y desplazamientos laterales y/o verticales a lo largo de fallas activas.

Los sismos ocurridos en el pasado, producto de ese movimiento de placas, pudieron haber dejado evidencias en los registros sedimentológicos depositados en el sistema lagunar de Higuerote, por lo que es de gran importancia conocer esos eventos, y correlacionarlos con alguna variación que se pueda observar en la columna sedimentaria.

La neotectónica en Venezuela puede observarse en el mapa presentado en la figura 14, donde se presentan en escala regional las fallas activas, teniendo en la planicie lagunar de Higuerote, la influencia directa de la Falla de la Victoria, que atraviesa la zona norte del centro del país y su terminación pasa por el lugar de estudio y la Falla de La Costa, que es la que está controlando la geomorfología a lo largo de toda la costa en esa zona.

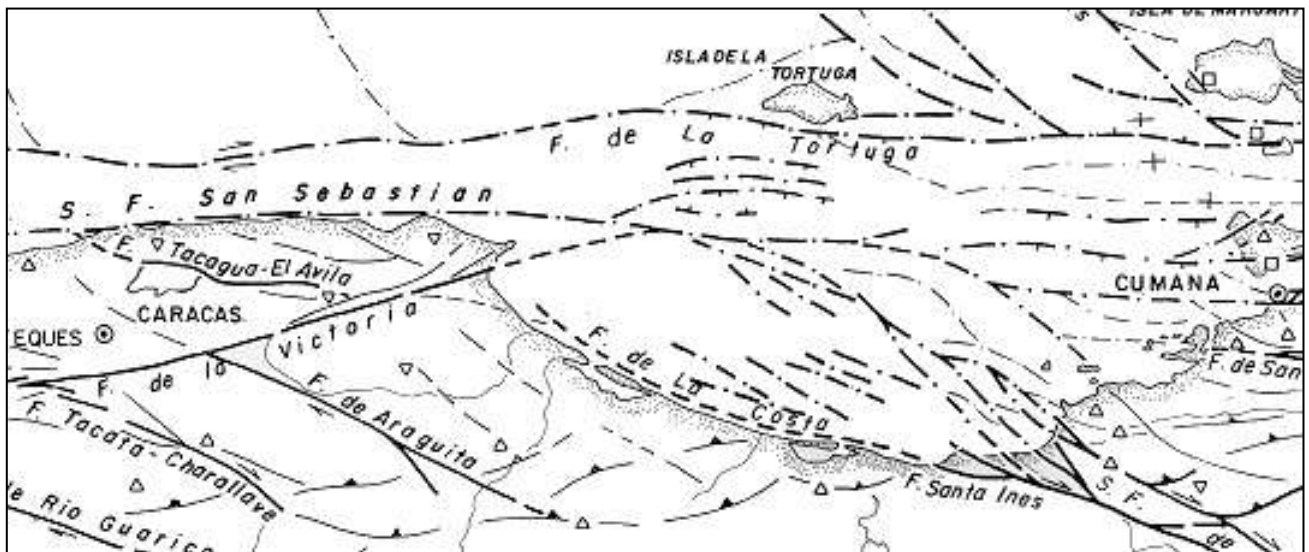


Figura 14. Neotectónica en la Costa Oriental de Venezuela. (Tomado de [26]).

3.8. Geoquímica de los sedimentos y aplicaciones quimioestratigráficas

Cuando se estudia de forma cuantitativa cada una de las geósferas de la Tierra y su interacción entre ellas, junto con los procesos que se están llevando a cabo en cada una, se está realizando un estudio geoquímico. Permite a través de los elementos químicos realizar múltiples interpretaciones. Siendo de interés, la utilización de la geoquímica con una herramienta para la reconstrucción paleoambiental de alta resolución [27].

Al evaluar los procesos sedimentarios, a través de la geoquímica, se están considerando las reacciones que se están llevando a cabo en un sistema acuoso, teniendo interés en el comportamiento de cada elemento según sus diferentes especies en un ambiente en particular. Refiriéndose a los equilibrios fisicoquímicos involucrados, que están controlando las condiciones presentes en el sistema ^[27].

Uno de los parámetros importantes a evaluar es el potencial iónico de cada elemento, el cual determina las condiciones en las cuales se formaran los minerales en un medio acuoso, que posteriormente serán depositados como sedimentos, teniendo una distribución de los elementos según, el radio iónico y la carga iónica ^[27], mostrados en la figura 15.

Para así tener elementos con bajo potencial iónico que permanecen en solución durante el proceso de meteorización y transporte, elementos con potencial iónico intermedio que son precipitados por hidrólisis y elementos con potencial iónico alto que forman aniones solubles, conteniendo oxígeno ^[27].

A su vez, el potencial iónico se puede interpretar como una medida de la electronegatividad que, mientras más pequeño sea el radio de un ion positivo, más elevada será su carga y su óxido será más ácido. Y cuanto más grande sea el radio, menor será su carga y el óxido será más básico ^[27].

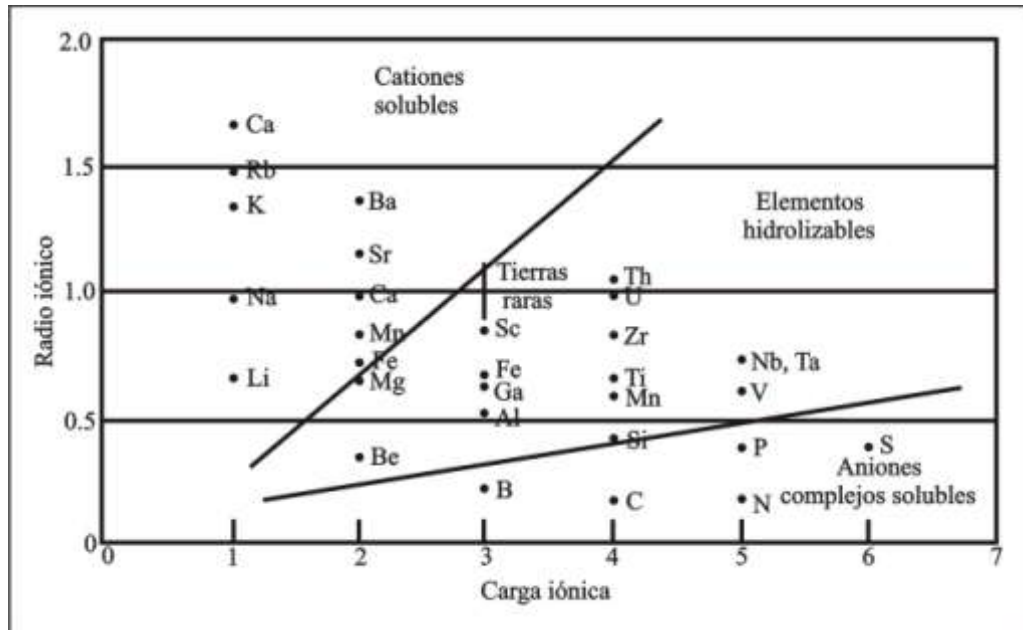


Figura 15. Separación geoquímica de algunos elementos según su potencial iónico. (Tomado de [27].)

Para evaluar la estabilidad de un elemento en un estado de oxidación en particular, se observa el potencial de oxidación-reducción, el cual varía conforme cambian las concentraciones de las especies que están reaccionando, interviniendo en esas reacciones iones de hidrogeno y de hidroxilos, medidos a través del pH. Teniendo así que las variaciones de pH en un sistema, produce cambios en el potencial redox, generando la estabilidad de determinada especie de un elemento frente a otras que no son estables a esas condiciones. Los elementos que pueden presentar dos o más estados de oxidación durante la solución, transporte y depósito de los mismos, representan una fuente directa de información de las condiciones redox del sistema [27].

Otros factores que controlan la movilidad de las especies químicas en los sistemas ambientales son el pH y el Eh. Donde la medida de pH indica la disponibilidad de protones en el medio acuoso, según la relación $\text{pH} = (-\log [\text{H}^+])$, controlando la

solubilidad de las especies. Y el Eh, indica la disponibilidad de electrones en el medio, controlado por el ambiente y las condiciones de oxidación y reducción ^[27].

Los valores de Eh y pH de ambientes naturales están controlados por varios factores, entre los cuales se presentan los procesos orgánicos de fotosíntesis, respiración y decaimiento, las reacciones de óxido-reducción involucrando hierro, azufre, nitrógeno y carbono, el balance entre el CO₂ disuelto y el carbonato de calcio en el agua natural entre otros. En la figura 16, se muestra la distribución general de los ambientes naturales según sus condiciones de Eh y pH comunes ^[28].

Especialmente los sistemas lagunares, presentan una mezcla en su composición ya que al ser un ambiente acuoso superficial, está en equilibrio con varias fuentes de aguas, como lo son las provenientes de las lluvias, las mareas, los ríos, la escorrentía superficial y el flujo subterráneo, generando grandes variaciones de Eh y pH en el sistema. La vegetación presente en este ambiente constituye un factor importante en el equilibrio del sistema, ya que controla el comportamiento de algunas especies presentes como por ejemplo, el fósforo y el nitrógeno ^[28].

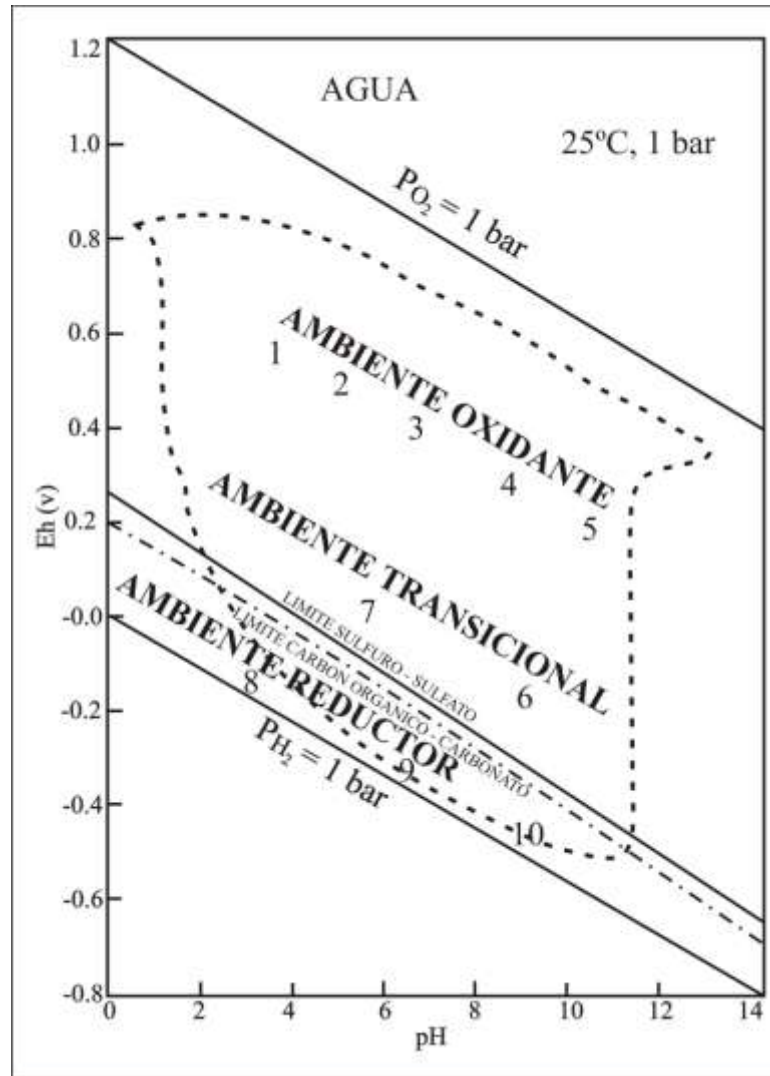


Figura 16. Diagrama Eh-pH genérico que muestra varias características. Los límites superior e inferior de estabilidad del agua donde P_{H_2} y $P_{O_2} = 1$ bar. La línea de puntos representa el rango de mediciones de agua naturales Eh-pH. La línea continua marca el límite de sulfuro-sulfato. La línea de rayas y punto limita por debajo el carbono orgánico y por encima el carbono para formar especies de carbonato. Los números indican ambientes oxidantes, de transición y reductores: 1: aguas de mina, 2: lluvia, 3: arroyos, 4: el agua del océano normal, 5: residuos de agua salina, 6: aguas subterráneas, 7: aguas de pantano, 8: suelos anegados, 9: aguas marinas euxínicas, 10: aguas ricas en materia orgánica, solución salina. (Tomado de [29]).

La quimioestratigrafía es la rama de la estratigrafía en la que se hace uso de atributos químicos para caracterizar y analizar una secuencia sedimentaria. Las interpretaciones se realizan, mediante la construcción de registros verticales que contienen la información geoquímica, contruidos a partir de datos crudos de elementos y relaciones interelementales ^[30].

Si un atributo químico genera perfiles característicos y además sus cambios verticales pueden ser usados para realizar una interpretación geoquímica, se denominan marcadores quimioestratigráficos y si varios marcadores quimioestratigráficos presentan inflexiones simultáneamente, a aproximadamente la misma altura estratigráfica, están definiendo un límite entre dos facies químicas diferentes denominadas quimiofacies ^[30].

Una vez definidas las quimiofacies presentes en el registro sedimentario de interés, las interpretaciones que se realicen dependerán de los objetivos que se tengan planteados, pudiendo aplicar esta herramienta para correlacionar con un alto nivel de detalle, unas secuencias sedimentarias lateralmente, determinar la proveniencia de las rocas estudiadas, establecer condiciones redox en el ambiente de depositación, condiciones de paleosalinidad, realizar reconstrucciones paleoambientales y paleoclimáticas, entre otras ^[30].

Trabajos recientes ^[31] ^[32] realizados en los Andes Venezolanos ubicados en el Estado Mérida, muestran como a través de la quimioestratigrafía de los sedimentos lacustres del Paleolago Los Zarpa, pueden establecerse interpretaciones de la señal paleoclimática holocena al igual que la caracterización geoquímica de las sismoturbiditas presentes en el registro sedimentario analizado en ese estudio.

3.9. Principios fundamentales de las técnicas analíticas usadas

Para poder construir perfiles quimioestratigráficos, es necesaria la determinación de las concentraciones de los elementos presentes en los sedimentos a estudiar y es por ello que los métodos espectrométricos con los que se identifican y cuantifican los elementos químicos son de gran importancia ^[30].

Existen tres tipos de métodos espectrométricos para caracterizar y cuantificar los elementos presentes en la materia y son la espectrometría óptica, la espectrometría de rayos X y la espectrometría de masas. Donde los primeros dos serán los utilizados en la parte experimental. La espectrometría óptica y la espectrometría de rayos X, se basan en la medida de la emisión, absorción, dispersión, fluorescencia y difracción de la radiación electromagnética, siendo de relevancia para este estudio, las técnicas que contemplan la espectrometría de emisión atómica (AES), la espectrometría atómica de rayos X, tanto fluorescencia de rayos X (FRX) como difracción de rayos X (DRX) ^{[33] [34]}.

Para realizar determinaciones analíticas mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica, es fundamental que los átomos se encuentren en forma de vapor, por lo que el proceso de atomización es necesario, para así pasar las partículas de estado líquido a gaseoso y poder medir la emisión ultravioleta/visible de estas especies atómicas en el vapor. Sin embargo la espectrometría de rayos X (fluorescencia y difracción) no necesita atomizar las muestras, ya que los espectros de rayos X de los elementos a analizar, son independientes de la manera en la que se encuentren estos elementos combinados químicamente en la muestra, permitiendo que las medidas puedan realizarse de forma directa sobre la muestra ^{[33] [34]}.

La espectrometría de emisión atómica de llama tiene su principal aplicación en la determinación de elementos metálicos del grupo de los alcalinos y los alcalinotérreos, los cuales son difíciles de detectar mediante otras técnicas analíticas. Estos elementos

se excitan a temperaturas relativamente bajas generando espectros sencillos y sin interferencias ya que se utilizan llamas frías para evitar la excitación de otros metales. La simplicidad de los espectros es debida a que están conformados por pocas líneas intensas dentro del rango del visible, permitiendo la cuantificación de las medidas de emisión de los átomos ^{[33] [34]}.

Los atomizadores empleados, no sólo volatilizan la muestra descomponiéndola en átomos o iones elementales sencillos en fase gaseosa, sino que también durante ese proceso, la llama aplica una energía sobre los átomos, excitando una parte de estas especies pasando momentáneamente a estados electrónicos superiores de mayor energía, los cuales luego de una rápida relajación de las especies excitadas, vuelven al estado fundamental de más baja energía, cediendo esa energía acumulada en forma de fotones o radiación ultravioleta/visible generando espectros de línea que son útiles para el análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos ^{[33] [34]}.

La espectrometría atómica de fluorescencia de rayos X (FRX), se fundamenta en la medición de cuantos de radiación X, emitidos luego de la excitación y relajación de los electrones en los niveles de energía, dando como resultado espectros de líneas de rayos X. Estos espectros son el producto de las transiciones electrónicas de los orbitales más internos de un átomo ^{[33] [34]}.

Cuando un elemento absorbe radiación de longitud de onda corta, como son los rayos X, los electrones de los orbitales más cercanos al núcleo del átomo, sufren una transición al producir un ion excitado con una capa K vacante, el cual después de un breve período, el ion vuelve a su estado fundamental, ya que los electrones de los orbitales externos sufren transiciones hacia el orbital que había quedado vacío, pasando por una serie de transiciones electrónicas desde niveles de alta energía hacia su estado fundamental, emitiendo radiación X de longitudes de onda idénticas a las que

resultaron de la excitación producida por el bombardeo de electrones. Siendo cada señal característica de un elemento en particular ^[33] ^[34].

En la espectrometría atómica de difracción de rayos X (DRX), el vector eléctrico de la radiación electromagnética de los rayos X y los electrones de la materia que atraviesa generan una dispersión, estos rayos X al ser dispersado por la estructura cristalina ordenada, generan interferencias constructivas y destructivas, y debido a que las distancias de los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación, da como resultado la difracción ^[33].

Para que se dé la difracción de rayos X, se requiere que el espaciado entre las capas de átomos sea aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la radiación y que los centros de la dispersión estén distribuidos en el espacio de una manera muy regular, los minerales, cumplen ambos requerimientos ^[33].

Cuando un haz de rayos X incide con un ángulo θ sobre la superficie del cristal, una porción del haz es dispersada por la capa de átomos de la superficie, otra porción de este haz, no es dispersada y penetra en la segunda capa de átomos, donde igualmente una porción es dispersada y otra porción no, penetrando hacia la tercera capa. La dispersión producida por los centros uniformemente espaciados, genera la difracción del haz ^[33].

En 1912 W.L. Bragg estudió la difracción de rayos X sobre cristales, generando la **Ley de Bragg**, mostrada en la figura 17, la cual contempla el choque de un haz con la superficie de un cristal formando un ángulo θ produciendo la dispersión como consecuencia de la interacción de la radiación con los átomos localizados en O, P y R, si la distancia $AP + PC = n \lambda$, donde n es un número entero, la dispersión estará en fase en OCD y el cristal parecerá reflejar la radiación X, además $AP = PC = d \sin \theta$, donde d es la distancia interplanar del cristal ^[33].

Así se puede describir que las condiciones para que tenga lugar una interferencia constructiva del haz que forma un ángulo θ con la superficie del cristal son:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Ec.1}$$

Siendo esta la ecuación de Bragg, hay que señalar que los rayos x son reflejados por el cristal solo si el ángulo de incidencia satisface la condición $\sin \theta = n \lambda / 2 d$, para todos los demás ángulos, tienen lugar interferencias destructivas ^[33].

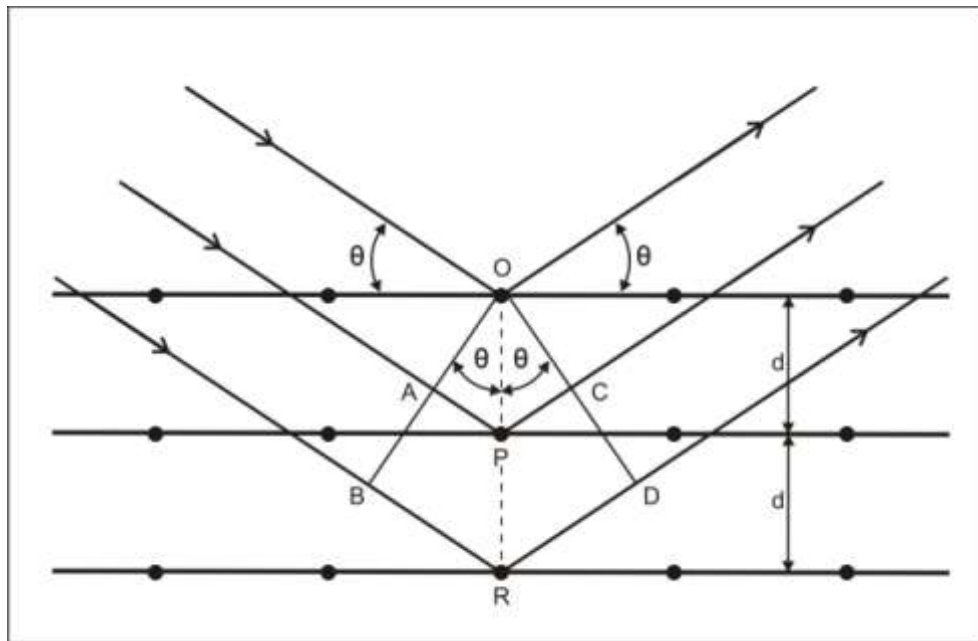


Figura 17. Difracción de rayos X producida por un cristal. (Tomado de [33]). Donde θ : ángulo entre el haz y la superficie del cristal, d : la distancia interplanar del cristal, A, B, C, D, O, P, R: puntos de referencia de las distancias consideradas.

Una vez definidas las técnicas analíticas a utilizar, en función de su disponibilidad, es fundamental conocer en qué consiste cada método analítico, ya que dependiendo de los objetivos que se tengan planteados, algunas son más apropiadas que otras.

Para la determinación de los elementos mayoritarios de interés como lo son, el aluminio, calcio, hierro, potasio, manganeso, silicio y titanio, se escogió la técnica de FRX, por su practicidad en cuanto al tratamiento e introducción de la muestra al equipo, y ya que estos elementos poseen concentraciones del orden de magnitud de porcentajes, se ajusta perfectamente a los límites de detección que se pueden obtener de estos análisis.

Otro elemento mayoritario es el sodio, el cual fue determinado mediante la técnica AES-llama, la cual se considera que entre las disponibles es la más apropiada para la medición de este elemento, que por tener bajo peso molecular, se hace muy difícil su detección a través de FRX. A pesar de tener una introducción de la muestra al equipo, relativamente simple, el hecho de llevar los sedimentos a solución, requiere un tratamiento de la muestra largo y engorroso, en el que hay que considerar el tiempo que se invierte para llevar a cabo esta técnica. En el caso de este estudio, el elemento sodio es de sumo interés e importancia, y es precisamente por eso, que su determinación es fundamental.

Finalmente, por ser una técnica no destructiva, la determinación cualitativa de las fases minerales presentes en los sedimentos a través de la técnica de DRX, también es considerada, práctica y sencilla, ya que el procesamiento de la muestra es muy simple y el tiempo de análisis es reducido.

4. Metodología experimental

El contenido de este capítulo contempla, las etapas llevadas a cabo para cubrir los objetivos de este trabajo, iniciando con una interpretación geomorfológica a detalle del área de estudio. De igual forma se describe la etapa de campo en la cual se extrajo el núcleo de sedimentos recientes ubicado en la planicie abandonada del sistema lagunar de Higuerote, Estado Miranda, para su posterior tratamiento en la etapa de laboratorio, donde se especifican los procedimientos físicos y químicos aplicados.

4.1. Etapa pre-campo

Dentro de la planificación de la etapa de campo, está contemplada la realización de un análisis fotogeológico del área de estudio, para así tener una visión extendida y un criterio preliminar de lo que se va a encontrar en el campo. Esta herramienta permite ver el contexto geológico en el que se encuentra la zona a estudiar, y permite la selección del lugar apropiado para el estudio y en este caso para la recolección del núcleo de sedimentos.

4.1.1. Interpretación geomorfológica preliminar del área de estudio

Se realizaron los análisis geomorfológicos sobre las fotografías aéreas de los años 1936 y 1993, detalles en la tabla 5, con las cuales se podrán realizar las interpretaciones de la evolución reciente en los últimos años del sistema lagunar de interés, mediante evidencias geomorfológicas. Utilizando como herramientas para lograr este objetivo, un estereoscopio de espejos y un estereoscopio de bolsillo, facilitado por el Centro de Geología del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

Al observar las fotografías aéreas de los diferentes años en la figura 18, se pueden tener un primer acercamiento a lo que posteriormente será la fotointerpretación, pero de ante mano se tiene que el sistema lagunar, posee tres sistemas de barras de arena, depositados en períodos de tiempo distintos. De igual forma se pueden observar con claridad las modificaciones antrópicas que han impactado el sistema natural de la laguna costera presente. Se observa de igual forma un aumento significativo en la vegetación presente en la laguna, correspondiente a manglares.

Al Oeste de las fotografías, se observa una unidad geomorfológica de tonalidad más clara, con ausencia de vegetación, de relieve uniforme y de muy poca altura, con zonas que presentan una mayor acumulación de agua hacia el norte, formando toda una unidad principalmente de suelos anegadizos, lo que puede representar esta zona es una antigua laguna, siendo este el lugar de estudio, donde se recolectó el núcleo de sedimentos.

Tabla 5. Características de las fotografías aéreas

<i>Características</i>	<i>Fotos antiguas</i>	<i>Fotos recientes</i>
<i>Año del Vuelo</i>	1936	1992
<i>Misión</i>	8	03.03.203
<i>Escala</i>	1:27000	1:25000
<i>Foto central</i>	819	032

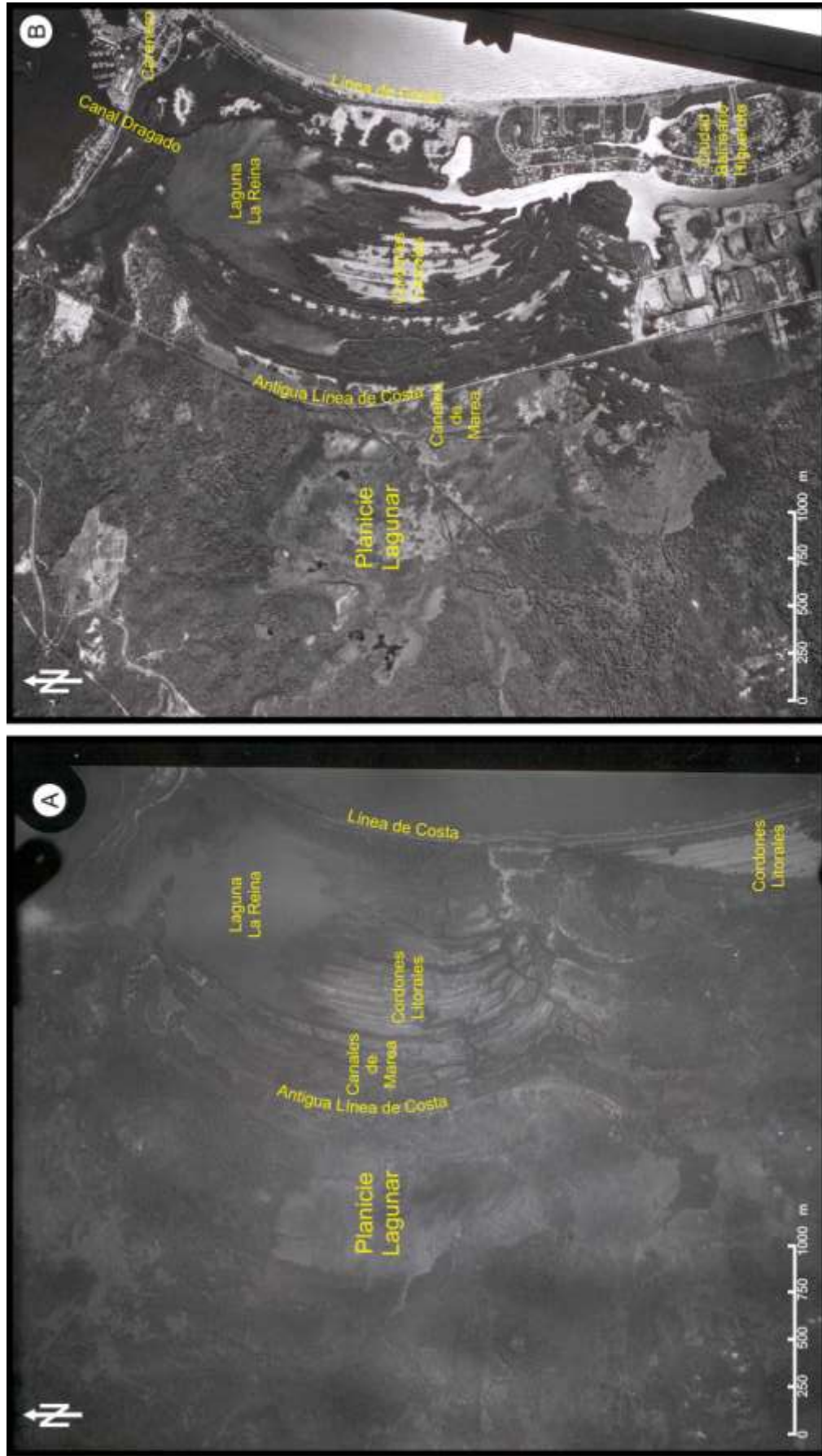


Figura 18. Identificación de unidades geomorfológicas en las fotografías aéreas de los años: A: 1936. B: 1992.

4.2. Etapa de campo

El sistema lagunar de estudio se encuentra en Higuero, Estado Miranda, ubicado a aproximadamente 3 Km de la costa. Esta planicie corresponde a la etapa final de una laguna costera, luego de ser colmatada, encontrándose las evidencias de la misma en la profundidad. Puede compararse el sistema antiguo al equivalente actual, la laguna costera ubicada al Este, que es la Laguna La Reina. En la figura 19, se muestra mediante imágenes satelitales la ubicación del núcleo recolectado.



Figura 19. Ubicación del Núcleo HSR-1.

4.2.1. Recolección del Núcleo HSR-1

Para realizar la extracción del núcleo HSR-1, se seleccionó un lugar ubicado en la planicie lagunar, presentando como características generales, espejos de agua, producto de precipitaciones durante días anteriores, desprovisto de vegetación, de igual forma en los alrededores, se observó dos grupos de vegetación, uno completamente seco, y otro verdoso. Al fondo en se observa vegetación boscosa. La ubicación del núcleo HSR-1 fue medida con el GPS Magellan, modelo Triton 2000 y las coordenadas UTM correspondientes son: 1.164.347N 810.910E.

La extracción se llevo a cabo, utilizando el tomador de núcleos de sedimentos no consolidados, fabricado en el Laboratorio de Sedimentología del Centro de Geología, del Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV. Que utiliza un sistema de percusión sin inducir deformación y con el cual se logró recuperar un núcleo de 60 cm de longitud, donde los sedimentos recolectados mantuvieron el orden estratigráfico y fueron colectados en un tubo de PVC de 2" de diámetro.

En la figura 20, pueden observarse algunas de las imágenes correspondientes a esta etapa de campo, en donde se muestra una visión general del sitio de trabajo, la ubicación de las coordenadas del núcleo extraído, el proceso con el tomador de núcleos y por último el núcleo recuperado con su longitud medida con una cinta métrica.

4.3. Etapa de laboratorio

Durante esta etapa de laboratorio, se llevaron a cabo una serie de actividades las cuales permitieron obtener las muestras en las condiciones necesarias para su posterior análisis. El núcleo de sedimentos recuperado en campo, debe ser abierto correctamente, seguido de esto se toman las muestras, para finalmente realizar el tratamiento físico y químico requerido.



Figura 20. Etapa de Campo, extracción del núcleo HSR-1. A: Planicie Lagunar. B: Ubicación de las coordenadas del punto de muestreo. C: Proceso de extracción del núcleo. D: Longitud del núcleo recuperado.

4.3.1. Proceso de apertura del Núcleo HSR-1

Ya habiendo recolectado el núcleo HSR-1, en la zona de estudio, fue llevado al laboratorio, y refrigerado a 4 °C hasta su apertura. Una vez establecidas las condiciones para su apertura, se marcaron guías para el corte longitudinal del núcleo, paralelas entre sí, dividiendo en dos partes iguales al núcleo, se realizó un montaje utilizando un

soporte universal, pinzas y una herramienta eléctrica (Dremel), y se procedió a dar inicio a la apertura.

Se realizaron dos cortes a lo largo del núcleo, siguiendo las líneas, previamente marcadas, y se cortaron las tapas por las guías, luego de verificar que todo el tubo de PVC estuviese cortado, se procedió a cortar el sedimento, utilizando un hilo de nylon y manteniendo separado los extremos del núcleo ya despegados, para que el sedimento no volviera a unirse, se llevo hasta el final el nylon, logrando así la apertura exitosa del núcleo.

Finalmente se limpió la sección de sedimentos, usando una cuchilla de forma redondeada, quitando el excedente, siempre en dirección de la laminación, para no mezclarlos ni alterar la composición de los sedimentos. En la figura 21 se presentan unas imágenes de este proceso, mostrando el montaje realizado para la apertura del núcleo y finalmente el núcleo abierto y limpio, el cual se guardó para su conservación, refrigerado a 4 °C.

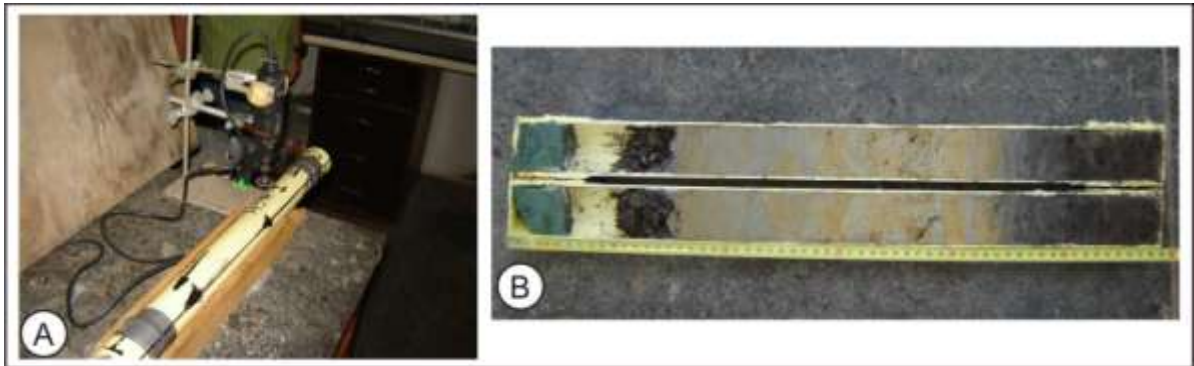


Figura 21. Proceso de apertura del núcleo HSR-1. A: Montaje realizado para abrir el núcleo. B: Núcleo HSR-1 después del proceso de apertura.

4.3.2. Muestreo sistemático

Con la finalidad de hacer un estudio geoquímico de la evolución de este antiguo sistema lagunar, es necesario tener un registro al detalle de los cambios composicionales presentes en los sedimentos, y es por ello, que se planea realizar un muestreo sistemático de alta resolución. Tomando en consideración el número de muestras para analizar y el tiempo previsto, se decidió muestrear cada 5 mm a lo largo de toda la columna.

El procedimiento llevado a cabo, consistió en tomar porciones representativas de la profundidad estratigráfica con intervalos de 5 mm, por lo que fue necesario, el uso de una cinta métrica, para tener conocimiento de las distancias reales. Utilizando un par de espátulas de acero inoxidable, se llevo a cabo la extracción de las alícuotas correspondientes a cada muestra, recolectándolas en envases de plástico, previamente limpios y rotulados, identificándolos con la nomenclatura HSR-1 seguida de la posición en la que fue tomada, medida en milímetros.

Finalmente luego de culminada la extracción de cada muestra, se obtuvo un total de 87 muestras, comprendiendo desde la muestra HSR-1-150 hasta la muestra HSR-1-580. Para complementar esta información, se presenta en la figura 22 el resultado final del núcleo, luego de haber extraído todas las muestras correspondientes.



Figura 22. Muestreo sistemático cada 5 mm.

4.3.3. Tratamiento físico y químico de las muestras

Una vez extraídas las 87 muestras, se tomaron en consideración los requerimientos que posee cada equipo que va a ser utilizado en la parte de análisis, y se realizaron los tratamientos de muestras correspondientes en cada caso.

En primer lugar, para llevar las muestras a estado líquido, se siguió el procedimiento ^[35], el cual consiste en realizar una fusión alcalina de los sedimentos, seguida de una disolución ácida. Cada una de las muestras fue homogenizada, usando un mortero de ágata, para posteriormente combinar cada muestra con una mezcla de fundentes, en una proporción 1:5 ^[35] ^[36].

Para la preparación de la mezcla de fundentes de boratos, se incorporaron metaborato de litio (LiBO_2) y tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) en una proporción 1:1 en masa. Requiriendo previamente la preparación del metaborato de litio, sintetizándose con los reactivos, carbonato de litio (Li_2CO_3) y ácido bórico (H_3BO_3) según la siguiente reacción:



Ya preparada la mezcla de fundentes, se pesaron en crisoles de grafito, previamente pulidos e identificados, 0,625 g de fundente con 0,125 g de muestra, se homogenizó la mezcla sólida, y se llevó a fundición en una mufla a 1000° C durante 30 minutos, para así obtener una perla vítrea de la muestra fundida. Esta etapa de fusión puede verse en las imágenes compiladas en la figura 23.

Luego de haber preparado las perlas correspondientes a las muestras, se continua con el proceso de llevar a líquido las muestras, siendo entonces esta fase, la disolución de las perlas en medio ácido, según el procedimiento, el cual consiste en colocar una perla en un vaso de precipitados, con aproximadamente 50 ml de ácido nítrico (HNO_3) al 10% v/v, preparado previamente, con agitación constante y un

calentamiento con una temperatura comprendida entre 40 °C y 60 °C, el tiempo requerido para la disolución total de la perla ^[35] ^[36].

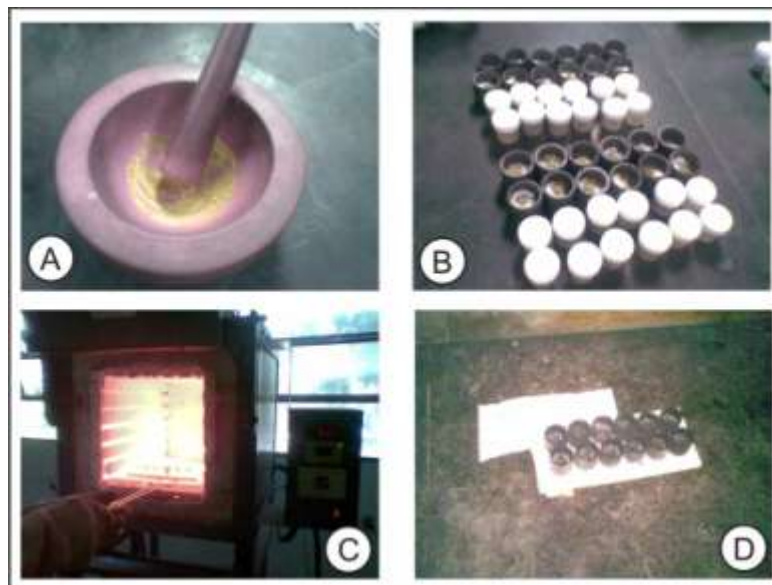


Figura 23. Etapa de fusión de las perlas. A: Pulverización de la muestra con un mortero de ágata. B: Muestras con mezcla de boratos en los crisoles de grafito. C: Introducción de los crisoles de grafito a la mufla. D: Perlas formadas en los crisoles de grafito.

Al tener la perla disuelta por completo, se deja enfriar la solución y se filtra cuantitativamente en un balón aforado de 100 ml, utilizando un embudo de vidrio tallo largo y un papel de filtro, enrasando la solución final con HNO_3 al 10% v/v. Para finalmente guardar las muestras en solución para su posterior análisis, al transferir la solución a envases de plástico de 125 ml, previamente limpios, curados y rotulados ^[35] ^[36]. Detalles de este procedimiento de disolución de las perlas, puede verse en la figura 24.

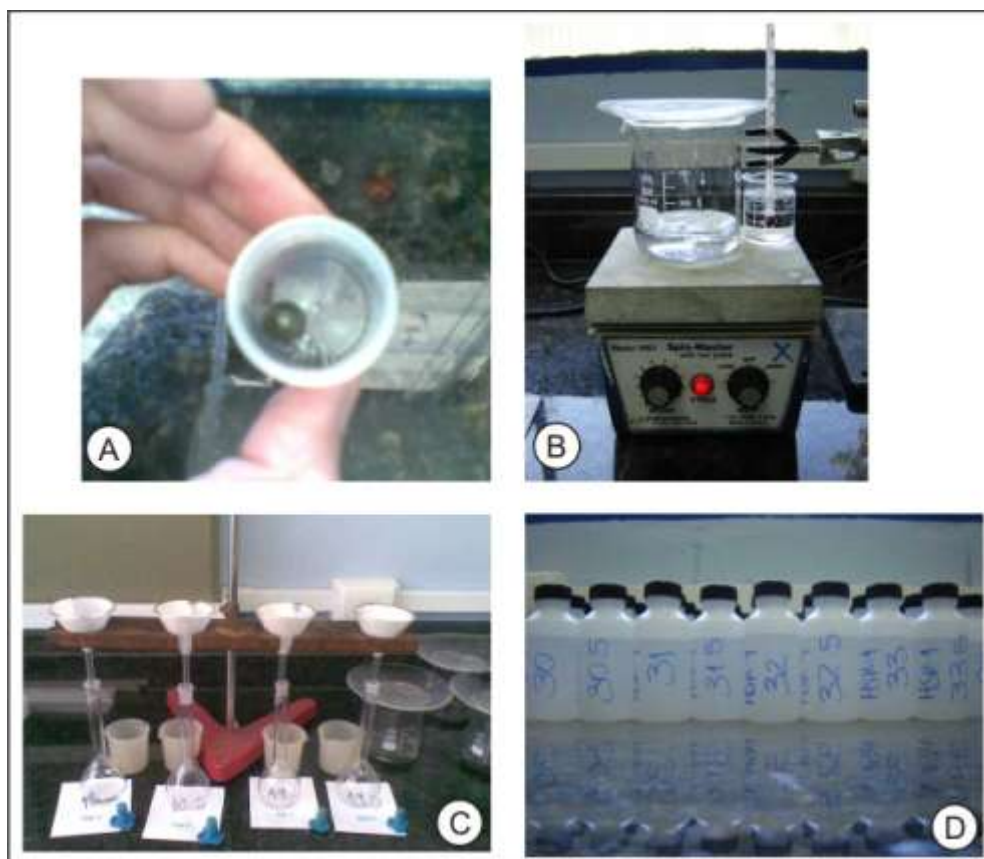


Figura 24. Etapa de disolución de las perlas. A: Perla de la muestra. B: Montaje para la disolución de las perlas. C: Filtrado cuantitativo de las disoluciones. D: Muestras en solución.

4.4. Análisis de las muestras

4.4.1. Determinación de elementos mayoritarios mediante FRX y AES

Para darle cumplimiento a los objetivos de este trabajo de investigación, es fundamental la determinación de las composiciones químicas mayoritarias presentes en los sedimentos recolectados en el núcleo HSR-1 y es por ello que se utilizaron las técnicas de fluorescencia de rayos X y espectrometría de emisión atómica.

Mediante el análisis de las muestras por fluorescencia de rayos X, se determinaron las cantidades porcentuales de los elementos expresados en óxidos y son los siguientes: aluminio (Al_2O_3), calcio (CaO), hierro total (Fe_2O_3), potasio (K_2O), manganeso (MnO), silicio (SiO_2) y titanio (TiO_2).

Se utilizó el equipo Minipal 2, marca Philips PANalytical, modelo Pw 4025 y las condiciones de trabajo fueron, 13 Kv, 30 μA , el medio fue aire y el tubo de Rh. Las líneas espectrales detectadas fueron $\text{K}\alpha$. Este equipo espectrómetro dispersivo de energía realiza análisis elementales simultáneos a las muestras, en estado sólido, específicamente polvo. Teniendo como ventaja, una simple preparación de la muestra y la recuperación total de la misma, ya que este método de análisis es no destructivo.

Las muestras a analizar, se prepararon colocando el sedimento previamente homogenizado y pulverizado con un mortero de ágata, en un portamuestra de plástico con una lámina de film transparente, limpio y seco, se compactó la muestra en polvo, realizando pequeños golpes con la mesa para garantizar la distribución homogénea de la misma dentro del portamuestras, se procedió a cerrarlo y rotularlo, estando listo para el análisis, detalles en la figura 25.

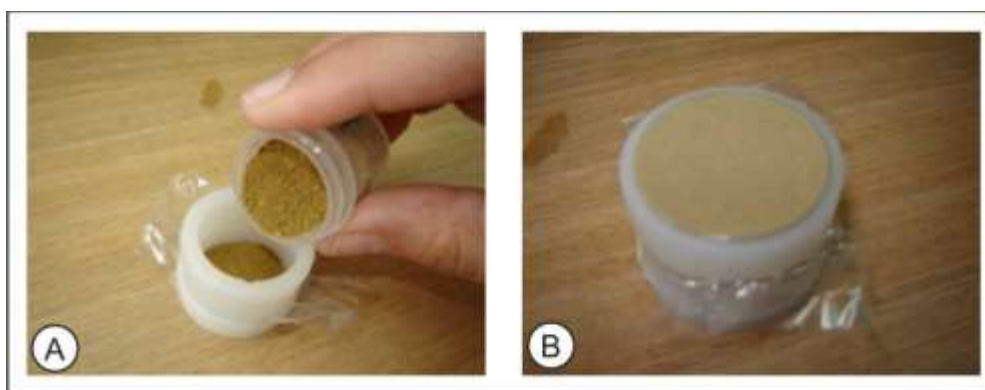


Figura 25. Montaje de la muestra de polvo para análisis de FRX. A: Se coloca la muestra solida, directamente en el portamuestras. B: Muestra lista para analizar en el equipo.

Una vez colocadas las muestras en los respectivos portamuestras, se introdujeron al equipo en tandas de 12 muestras, identificándolas en el programa según la posición colocada, se procedió a cerrar la tapa y se dio inicio al análisis, como se muestra en la figura 26.

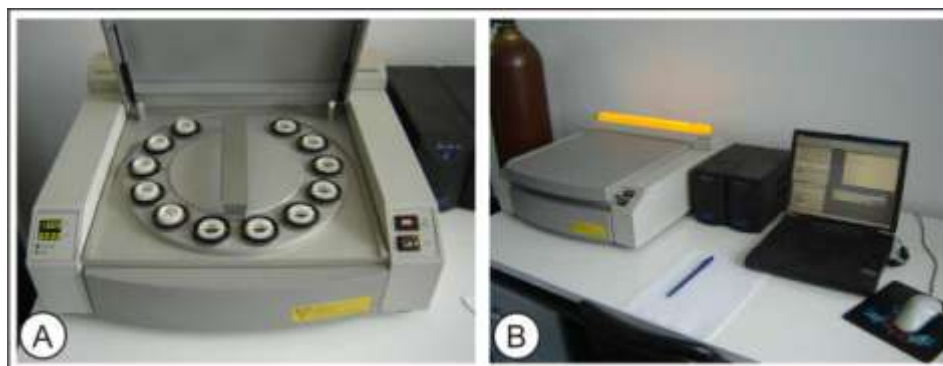


Figura 26. Análisis en el equipo de FRX. A: Equipo de FRX con capacidad para 12 muestras. B: Lugar de trabajo con el equipo de FRX.

Para la determinación de las concentraciones de los elementos, se realizaron las curvas de calibración, utilizando materiales de referencia certificados entre los que se destacan AGV-1, BCR-1, DST-1, entre otros. Las longitudes de onda detectadas para cada elemento corresponden a la transición $K\alpha$ para cada uno de ellos y son: Al: 1,486nm, Ca: 3,690nm, Fe: 6,398nm, K: 3,312nm, Mn: 5,894nm, Si: 1,739nm, Ti: 4,508nm. Los resultados obtenidos se presentaran en el siguiente capítulo.

Mediante el análisis de las muestras por emisión atómica a la llama, se determinaron las cantidades porcentuales del elemento sodio y a través de relaciones gravimétricas es expresado en óxido (Na_2O). Se utilizó el equipo AAnalyst 200 (atomic absorption system), marca Perkin Elmer y las condiciones de trabajo fueron, llama de acetileno-aire (2100 - 2400 °C) y la longitud de onda detectada para el sodio fue λ : 589,0 nm. Este equipo de absorción atómica, trae un dispositivo que permite la

medición por emisión de ciertos elementos, estando entre uno de ellos, el elemento de interés que es el sodio.

Las muestras introducidas al equipo, requieren estar en fase líquida, y fueron previamente preparadas mediante el método de fusión alcalina y disolución ácida, siendo aspiradas directamente desde el frasco que las contiene y atomizadas en la llama, como se puede observar en la figura 27. Los resultados obtenidos de este análisis, están presentados en el siguiente capítulo.

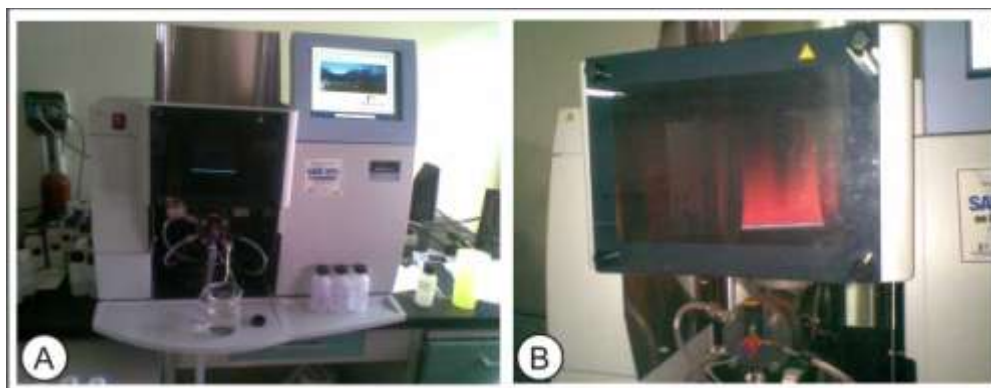


Figura 27. Análisis en el equipo de absorción atómica. A: Equipo de AES. B: Detalle de la llama.

4.4.2. Identificación de fases minerales por DRX

Se realizó el análisis mineralógico de las muestras de sedimentos mediante la técnica de difracción de rayos X, donde se identificaron y determinaron las fases minerales presentes, y a través de la normalización del área bajo la curva, se determinaron las distribuciones porcentuales de los minerales a lo largo de la columna de sedimentos.

El equipo usado fue el D8I, marca Bruker, modelo D8 Advance, las condiciones de trabajo fueron, 45 Kv, 20 mA, ángulo 2θ de 2° a 88° , velocidad de medición 3° por minuto, sin rotación y tubo de cobre (Cu). La introducción de la muestra es en estado

sólido, siendo esta una ventaja ya que la preparación es simple y como la técnica es no destructiva, puede recuperarse totalmente la muestra, como puede verse en la figura 28. Los resultados obtenidos de la caracterización de las fases minerales presentes se muestran en el siguiente capítulo.

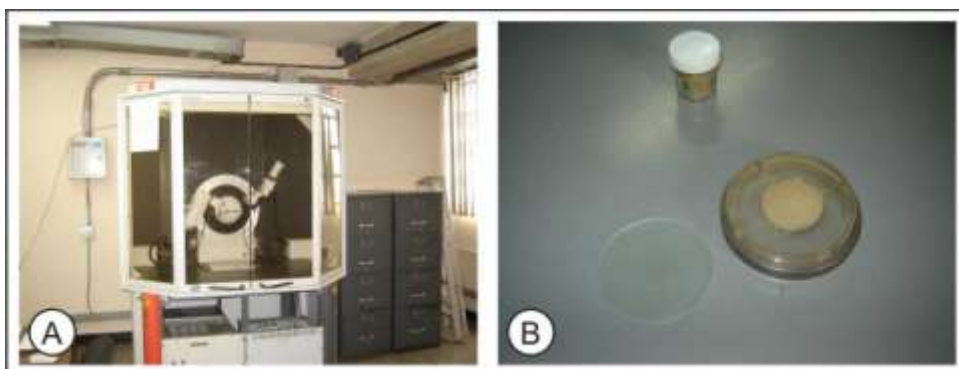


Figura 28. Análisis en el equipo de difracción de rayos X. A: Equipo de DRX. B: Montaje de la muestra.

4.4.3. Análisis complementarios

LOI

Para la determinación del porcentaje de pérdida por ignición (LOI: Lost On Ignition), que representa la materia orgánica, los carbonatos y el agua de constitución, se pesaron 0,5 g de cada una de las muestras, en un crisol de porcelana, previamente limpio, seco y pesado. Estas muestras fueron llevadas a la estufa a 105 °C durante 1 hora, se sacaron y se colocaron en el desecador hasta enfriarse. Se pesaron las muestras secas y se determinó el contenido de humedad de las muestras.

Seguido de esto, las muestras secas se calcinaron al llevarlas a la mufla a 950 °C durante 2 horas, se sacaron y se colocaron nuevamente en el desecador hasta enfriarse, para luego pesarlas y determinar el porcentaje de pérdida por ignición.

Presencia de carbonato de calcio

En cuanto a la determinación de presencia de carbonatos en las muestras, se tomo una pequeña cantidad de muestra, se coloco en un vidrio de reloj y se le agrego unas gotas de ácido clorhídrico (HCl) al 10% v/v, tomando como resultado positivo de esta prueba la efervescencia de los carbonatos al generar dióxido de carbono (CO₂). Los resultados obtenidos de estas dos pruebas complementarias, se presentan en el próximo capítulo.

Determinación del CIA

Para la determinación del grado de meteorización, a través del factor denominado: Índice de Alteración Química (CIA: Chemical Index of Alteration), se pueden relacionar los óxidos comunes presentes en los sedimentos, como lo son Al₂O₃, CaO, Na₂O y K₂O ^[37]. El valor de CIA viene dado por la Ecuación 2:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100 \quad Ec.2$$

El valor de CIA puede ser utilizado para evaluar porcentualmente el impacto climático, de humedad o sequedad, que han tenido los sedimentos, reflejado en las cantidades de los elementos mayoritarios solubles, ya que al aumentar la meteorización, se produce una pérdida de CaO, Na₂O y K₂O en relación con el Al₂O₃ ^[38].

5. Resultados

5.1. Geomorfología del sistema lagunar de Higuerote

La zona de estudio se encuentra ubicada a nivel regional en el borde occidental de la bahía de Barcelona, en los alrededores de la ciudad de Higuerote y el pueblo Carenero. En general el sistema lagunar Cuaternario, se encuentra entre la Cordillera de la Costa y el mar Caribe, presentando subambientes como una laguna costera, cordones litorales, barras de arena, una planicie lagunar y canales de marea.

El gran cordón litoral actual, se depositó desde la punta de Higuerote hasta el promontorio rocoso donde se encuentra Carenero, ocasionando el cierre de la laguna costera, Laguna La Reina, donde antiguamente el ambiente estaba constituido por una gran bahía de curvatura mucho más acentuada que la costa actual. Debido a la baja cantidad de aporte de sedimentos transportados por el Río Tuy y la rapidez de la subsidencia en la costa, se dificulta la formación de un nuevo cordón litoral arenoso ^[39].

El estudio fotogeológico del año 1936, presente en la figura 29, es el correspondiente a la interpretación de las condiciones antiguas del sistema lagunar, donde puede considerarse como un ambiente netamente natural, a diferencia de las condiciones presentes para el año 1992, donde la construcción de urbanizaciones modificó el ambiente sedimentario.

La laguna costera actual, posee un sistema de cordones litorales internos, que se apoyan sobre un promontorio rocoso ubicado al norte. Estos cordones pueden dividirse en dos partes, según su disposición geomorfológica, presentando una curvatura mas pronunciada hacia el continente y una disminución en la curvatura de estos cordones a medida que se acercan a la línea de costa.

En cuanto al drenaje dentro de la laguna y a través de las barras mostrado en la figura 29, se puede resaltar la zona en que el drenaje desemboca en el mar y otra característica resaltante es que el drenaje está cortando las barras en vez de atravesarlas como es lo esperado, esto posiblemente se deba a unas zonas de debilidad preferencial, por tectónica activa, que poseen las barras en esa dirección, que permiten que el agua pase más fácilmente a través de ellas, estos drenajes están orientados Noreste Suroeste.

La formación de los cordones litorales en la zona Sur del sistema, se ve claramente como se encuentra interrumpida por un drenaje, lo que no permite que la depositación de los sedimentos continúe, siendo quizás, una evidencia de falla. Los dos subsistemas de barras de arenas que se pueden observar dentro de la laguna, poseen una orientación geomorfológica particular, observándose ligeramente una disminución de la altura de estos cordones hacia el norte, siendo evidencias de tectónica activa. El flujo de agua en este sistema lagunar actual puede observarse que está regido por el flujo de entrada y salida de agua, a través de los drenajes que la conectan con el mar que atraviesa la barrera principal, de igual forma el aporte por infiltración a través de la barrera como es característico de este tipo de ambientes sedimentarios.

La otra unidad litológica, formada por rocas sedimentarias, de la Formación Carenero de origen fluvial, depositada por un río importante proveniente de la montaña, que desembocaba al norte del sistema lagunar actual, de edad Mioceno-Plioceno, constituido por colinas de poca altura, de releve suavizado y una alta vegetación boscosa, puede observarse al Oeste del sistema al igual que el promontorio terminal en donde se apoya el sistema de cordones litorales, pertenece a esta Formación, estando en contacto con el sistema lagunar de Higuerote.

La fotointerpretación geomorfológica de las fotografías aéreas del año 1992, presente en la figura 30, corresponde a la evaluación de las condiciones actuales del

sistema lagunar de Higuero. En donde a diferencia del vuelo fotográfico realizado en 1936, se observan cambios en el ambiente sedimentario, generados por actividades antrópicas.

Se pueden observar las evidencias de este impacto del hombre en la zona, por la construcción de carreteras, obras civiles conformadas por edificaciones, casas, embarcaderos, entre otros. Al igual que las modificaciones realizadas en la laguna costera actual, a la que para fines de un desarrollo urbanístico, se modificó todo el sistema hidrodinámico natural, al cerrar las salidas naturales del agua de la laguna hacia el mar, y abrir un canal a través del promontorio rocoso de la Formación Carenero anteriormente formado, que comunica la laguna con el mar, ubicado al Norte de la misma, hacia Carenero. El relleno y la construcción de obras civiles, sobre los cordones litorales, al sureste de las fotografías, no permite observar este subambiente.

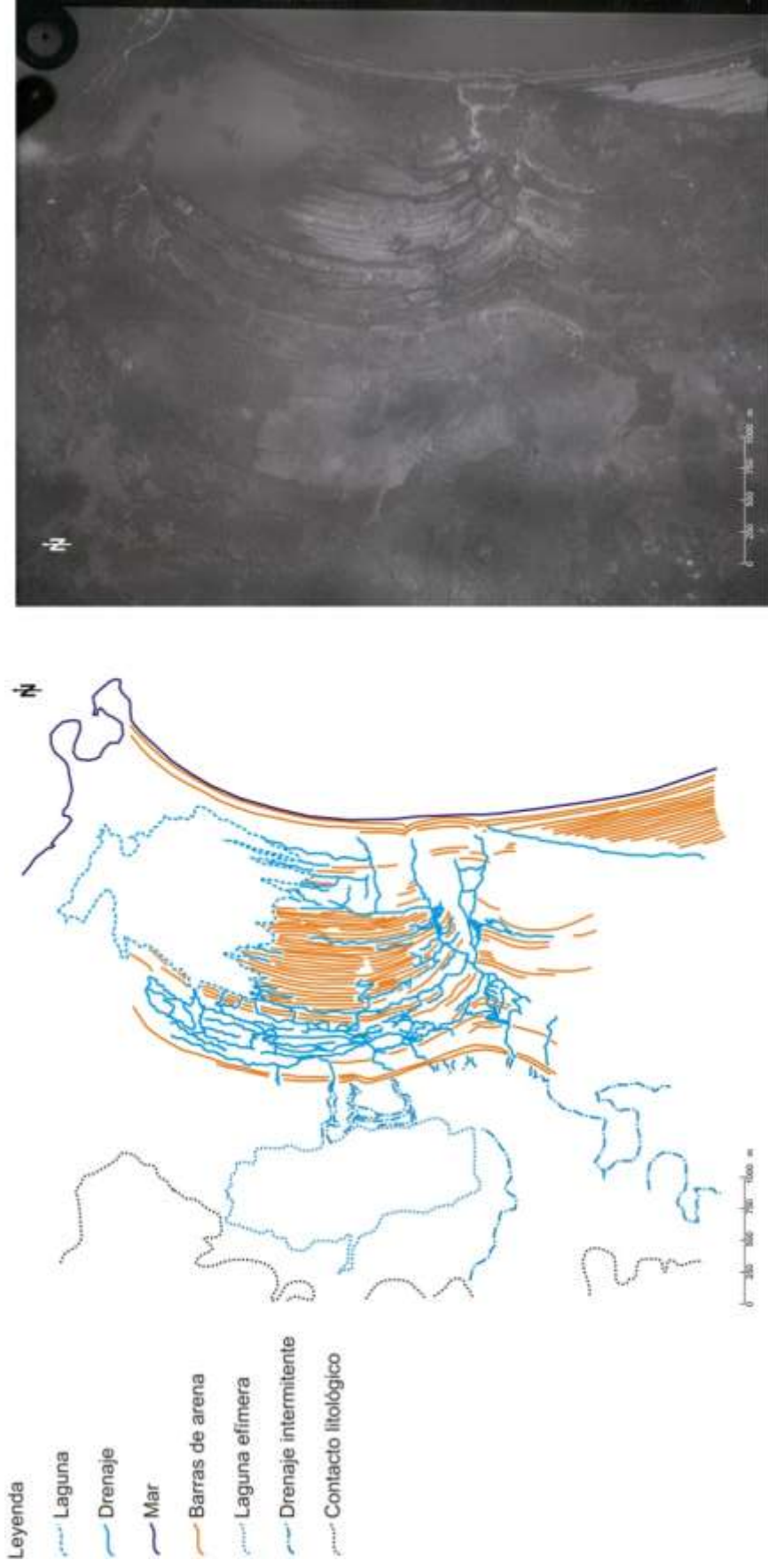


Figura 29. Interpretación geomorfológica de las fotografías aéreas del año 1936.

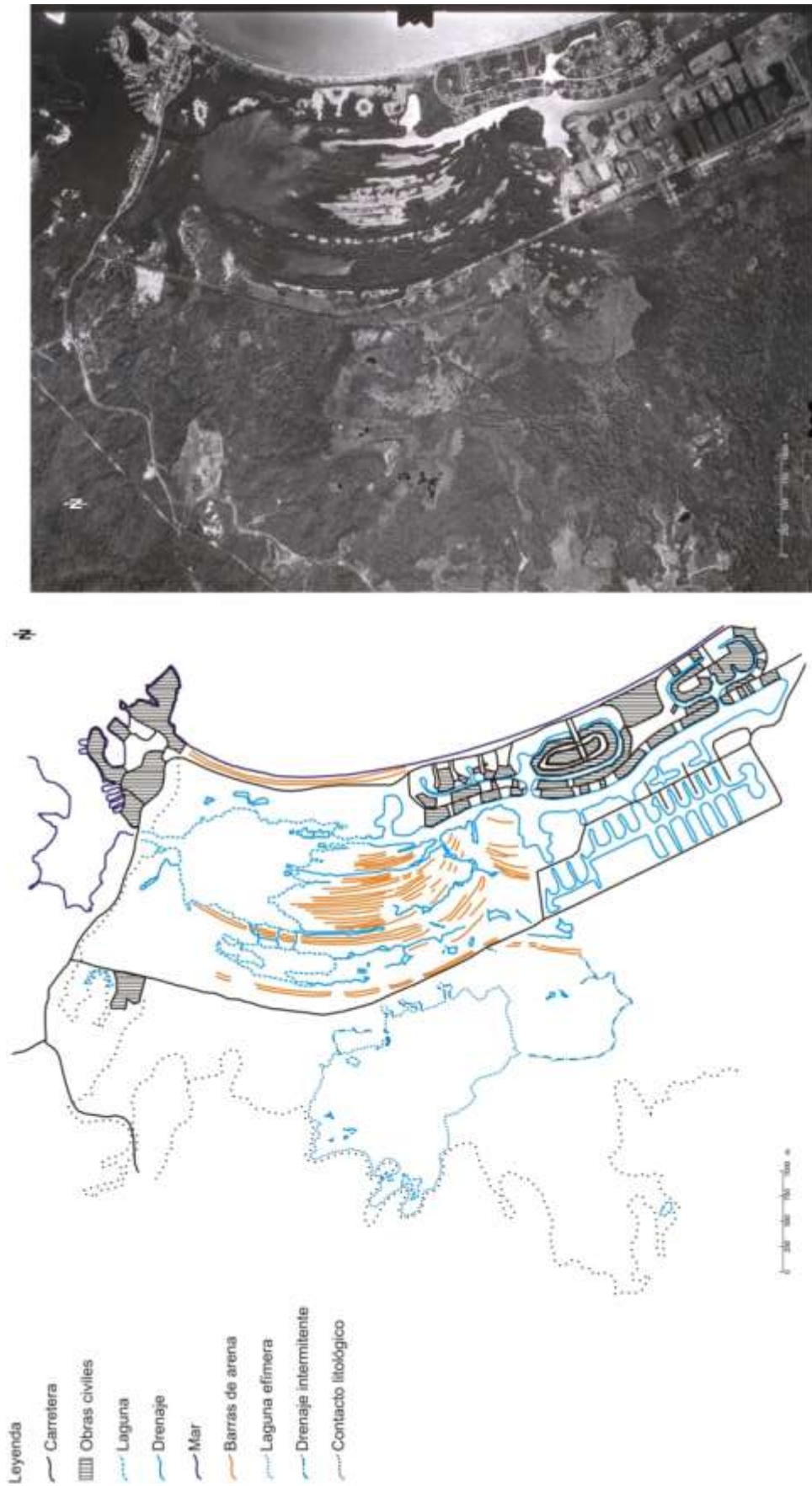


Figura 30. Interpretación geomorfológica de las fotografías aéreas del año 1992.

5.2. Descripción sedimentológica del Núcleo HSR-1

El núcleo HSR-1 tiene una longitud de 59 cm, medidos de tope a base, recolectado en un tubo de PVC de 2" de diámetro. Se puede dividir su contenido en varias secciones, al tope se encuentra el oasis de floristería ocupando los primeros 6 cm, que fue colocado en campo al recolectarlo, permitiendo la facilidad al transportarlo y manteniendo la humedad natural de los mismos. Seguido de esto, se encuentra un espacio vacío entre 6 cm y 10 cm. Ya a partir una profundidad de 10 cm y hasta los 59 cm, está contenida la columna a describir a continuación, esquematizada en la figura 33.

Entre 10 cm y 15 cm, se observa la presencia del suelo actual, formado principalmente por materia orgánica, con tonalidades oscuras, destacándose las raíces y restos de caracoles presentes los cuales se pueden observar a detalle en la figura 34-A, donde uno de ellos presenta su estructura completa. La composición de esta sección esta básicamente controlada por la vegetación presente en la zona. El muestreo realizado no contempló muestras de esta sección, ya que este suelo no preservó su posición estratigráfica durante el transporte del campo al laboratorio.

A partir de los 15 cm, se inició el muestreo. Entre 15 cm y 28 cm, se observan sedimentos finos, que predominantemente presentan una coloración de grisácea a amarillenta, se observan estructuras sedimentarias como laminación paralela y estratificación cruzada, mostradas en detalle en la figura 34-B. En esta sección entre 24 cm y 27 cm, se destaca un nivel de oxidado, diferenciándose del resto por su coloración y su disposición no es concordante con la estratificación. En ciertas zonas de esta sección, se observan pequeñas raíces de colores oscuros, característicos de materia orgánica. Hay presencia de cuarzo, yeso, dolomita, illita, gohetita y calcita.

Un nivel definido entre 28 cm y 39 cm, se caracteriza por presentar un alto grado de oxidación, sedimentos finos grisáceos y con muchas zonas de tonalidades naranjas a rojizas por los óxidos, como se puede observar en detalle en la figura 34-C. No presenta laminación paralela, quizás borrado por la bioturbación, que permitió una entrada de agua a la columna de sedimentos, y promovió la oxidación de los minerales. Se destacan unos niveles de arenas, los cuales no tiene una disposición concordante con la horizontal. Los restos de raíces de colores oscuros, están presentes también en esta sección. Se observan unos minerales en la figura 34-D de habito tabular, transparente, con 1 cm de tamaño, correspondientes al yeso, determinado por DRX, en la figura 32, estos minerales no crecieron concordantes con la estratificación, sino entre los sedimentos, como atravesándolos o cortándolos, mostrando el detalle en la figura 31. La formación de estos minerales en esta posición permite decir que en los espacios dejados por el paso de organismos, fueron rellenados con agua saturada en iones de calcio (Ca^{+2}) y sulfatos (SO_4^{-2}), generando la precipitación y permitiendo el crecimiento de minerales de sulfato de calcio hidratados, como lo es el yeso. Otros minerales presentes son el cuarzo, illita, goethita y dolomita.

Entre 39 cm y 45 cm se presenta un nivel se sedimentos finos de color gris con tonalidades amarillentas, dispuestos en láminas paralelas. Un nivel de arenas de aproximadamente 2 cm de espesor, de color gris está presente, sin embargo su disposición no corresponde con la de las láminas de los sedimentos finos como puede verse en detalle en la figura 34-E. También se observa la presencia de restos de raíces de colores oscuros. Hacia la base de esta sección se detecta un cambio transicional en la coloración de los sedimentos, pasando de tonalidades grisáceas-amarillentas a tonalidades grises oscuras, manteniendo la laminación paralela.

La sección comprendida entre 45 cm y 51 cm, se caracteriza por presentar intercalaciones de láminas de sedimentos finos de colores gris claro y gris oscuro, disminuyendo la claridad de la separación de las láminas hacia la base de la sección,

donde ya no pueden detectarse. Se observa entre 47 cm y 49 cm una laminación cruzada, como muestra en detalle la figura 34-F. Están presentes minerales de yeso, cuarzo e illita.

La última sección ubicada en la base de toda la columna, entre 51 cm y 59 cm, una alta cantidad de materia orgánica de color marrón puede observarse a detalle en la figura 34-G, sedimentos finos de color gris oscuro también se detectan. Esta sección no presenta estructuras sedimentarias, y por su aspecto podría tratarse de un paleosuelo, presentando minerales de yeso, cuarzo e illita.

Figura 31. Minerales de yeso.

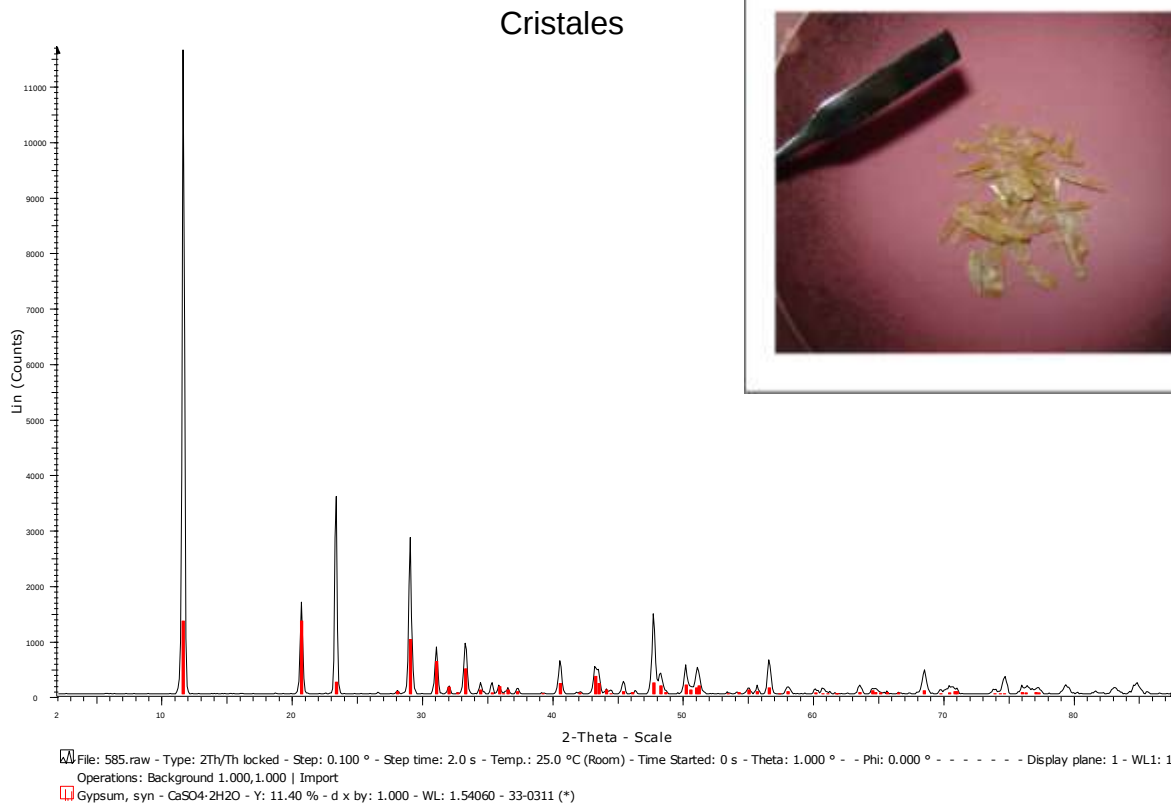


Figura 32. Difractograma de los cristales, indicando la fase mineral de yeso.

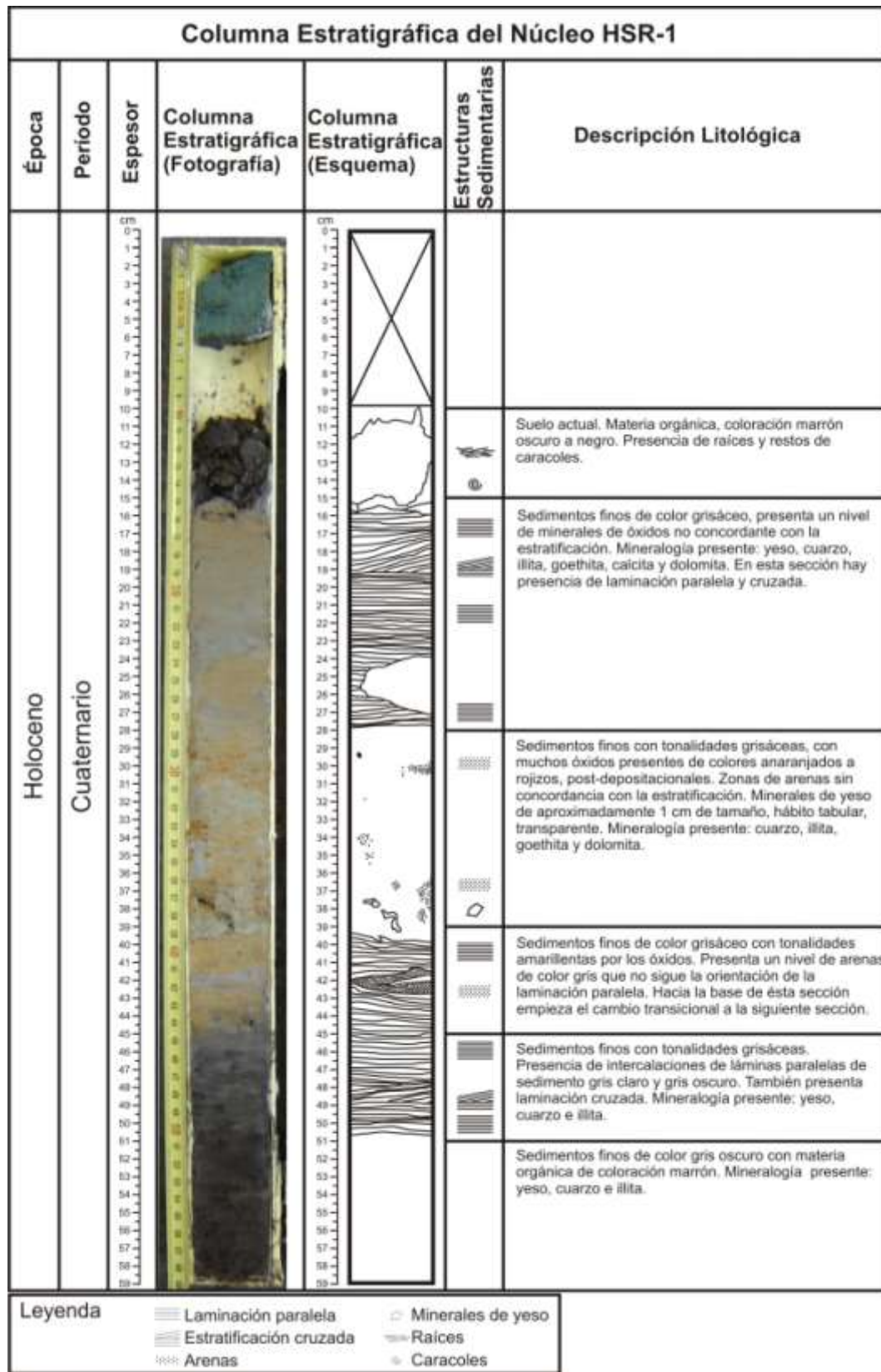


Figura 33. Columna estratigráfica del Núcleo HSR-1.

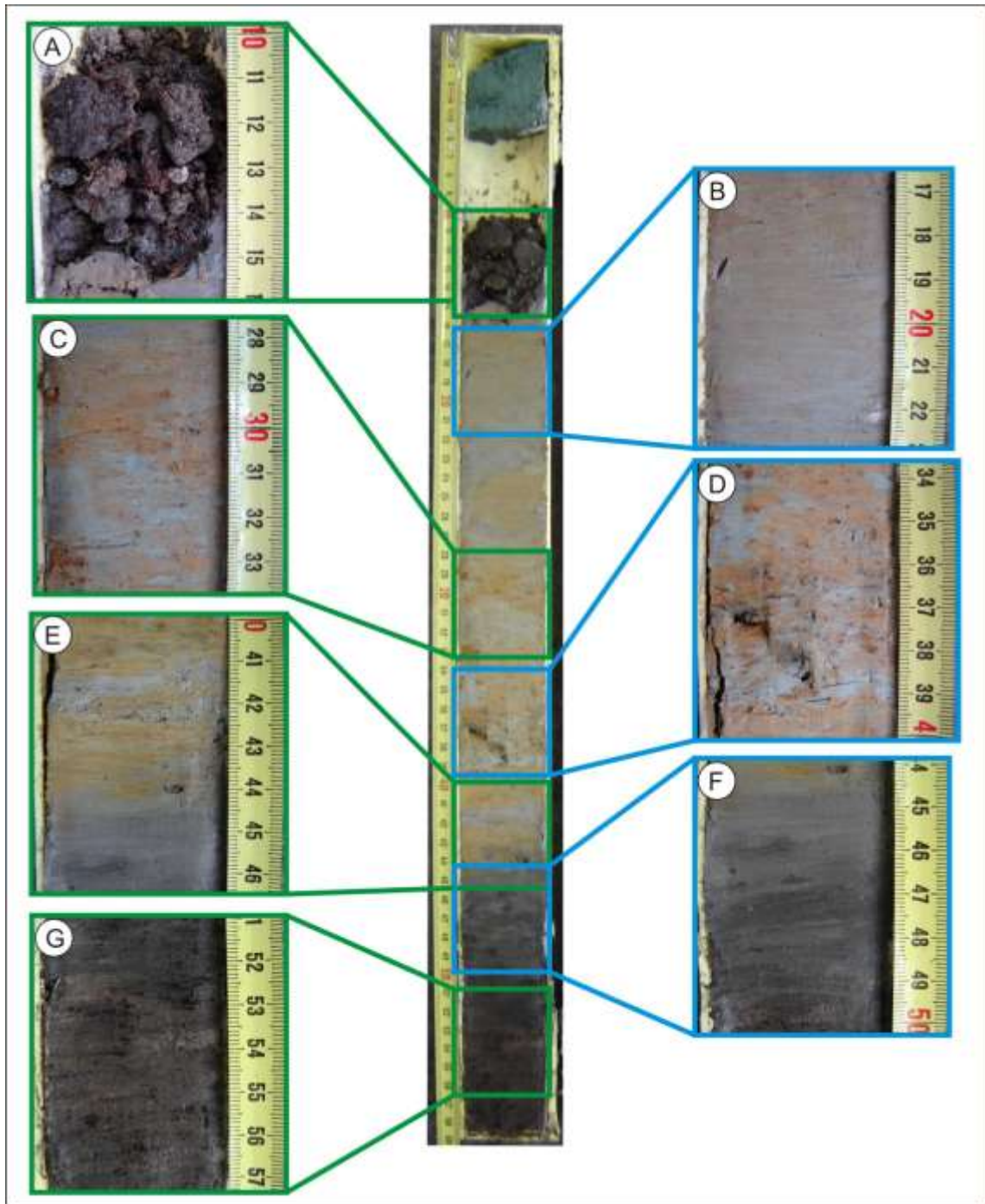


Figura 34. Detalles de la columna estratigráfica del Núcleo HSR-1. A: Raíces y restos de caracoles. B: Laminación paralela y cruzada. C: Sedimentos con óxidos color anaranjado. D: Minerales de yeso en los sedimentos. E: Laminas paralelas, cambio abrupto. F: Laminación cruzada en sedimentos grisáceos. G: Materia orgánica.

5.3. Determinación aproximada de la edad del Núcleo HSR-1

Una medida para determinar aproximadamente el tiempo, en el registro sedimentario recuperado en el Núcleo HSR-1, se puede llevar a cabo a través de la tasa de sedimentación de un sistema lagunar litoral, ubicado en las costas orientales venezolanas, como lo es la Laguna de Unare. Al no poseer la datación de las muestras de estudio, esta medida de la edad relativa, al comparar con un sistema similar, es la mejor aproximación que se puede obtener con las herramientas disponibles.

Los datos de ^{14}C , obtenidos en el Núcleo San Juan de la Laguna de Unare, reflejan la edad del paleosuelo lagunar estudiado, teniendo como resultado una edad de $4340 \pm 40 \text{AP (BP)}$ ^[13]. Esta datación requiere ser calibrada y este procedimiento se llevó a cabo utilizando el programa OxCal ^[40], obteniendo que la edad para este núcleo de 1 metro de longitud es de 4685 CalBP, mostrada en la figura 35, determinándola al interceptar el máximo de probabilidad de la edad sin calibrar, con la curva de calibración de datos atmosféricos, de la cual se tiene un segmento de posibilidades, que al tomar el punto medio, y proyectarlo en el eje de las edades calibradas, se obtienen las mayores probabilidades de que esa sea la edad del paleosuelo.

Una vez calibrada la datación de ^{14}C , se procedió a determinar la tasa de sedimentación, conociendo la longitud del núcleo San Juan y su edad calibrada, se pudo determinar la cantidad de milímetros depositados anualmente, siendo esta velocidad de 0,2 mm/año.

Tomando como valor de referencia esta tasa de sedimentación, y extrapolándola al Núcleo HSR-1, de 50 cm de longitud, se tiene una edad de 2500 CalBP, siendo ésta una primera aproximación de las edades a determinar en un futuro.

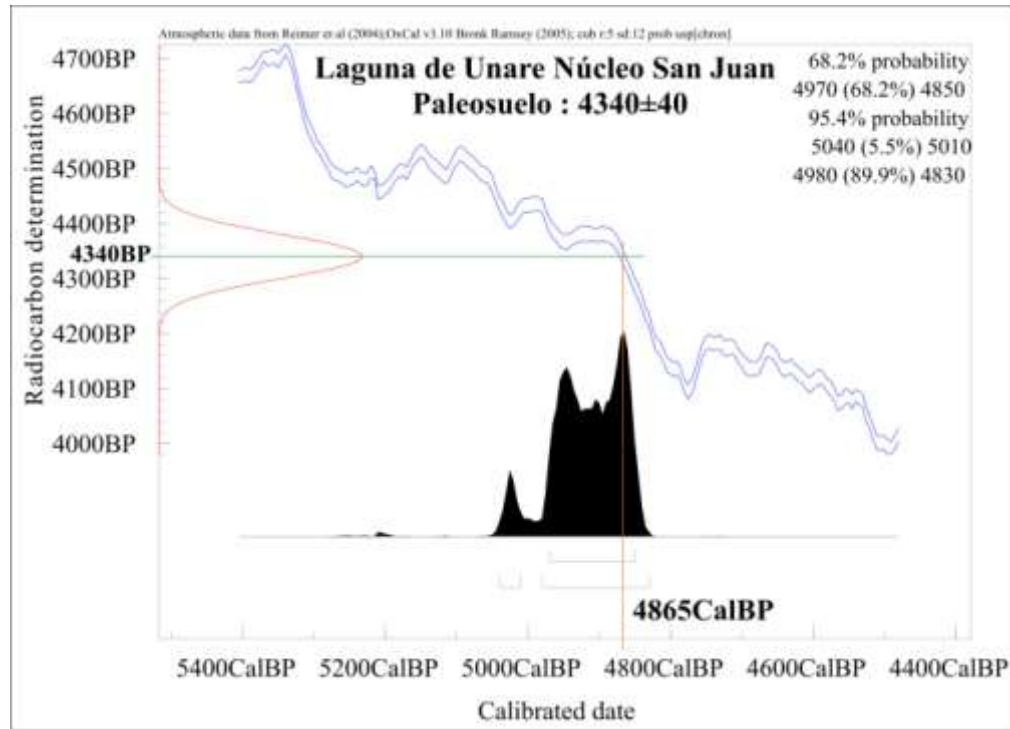


Figura 35. Calibración de los datos de ^{14}C de la Laguna de Unare.

5.4. Estimación del nivel de marea local.

Para la medida de las mareas, se cuenta con una valiosa información extraída de los datos de campo, y esta corresponde a los manglares y más específicamente a la especie *Avicennia germinans*, la cual posee raíces aéreas llamadas neumatóforos, que crecen como una respuesta de ese aumento relativo del nivel del mar, y más específicamente, el nivel de inundación en la laguna. Ya que los manglares al estar ahogados, como acto de supervivencia envían señales a los neumatóforos para que estos crezcan a una longitud necesaria y así poder oxigenarse y continuar viviendo. Este proceso cumple con el ciclo lógico de las especies el cual contempla que no se hará un gasto innecesario de energía, por lo que la medida de crecimiento de los neumatóforos es justo la necesaria para vivir.

Al observar actualmente, las orillas de la Laguna La Reina, la presencia de neumatóforos de 40 a 50 cm de altura, brindan una medida directa de los niveles de mareas en la zona, como se puede observar en la figura 36.

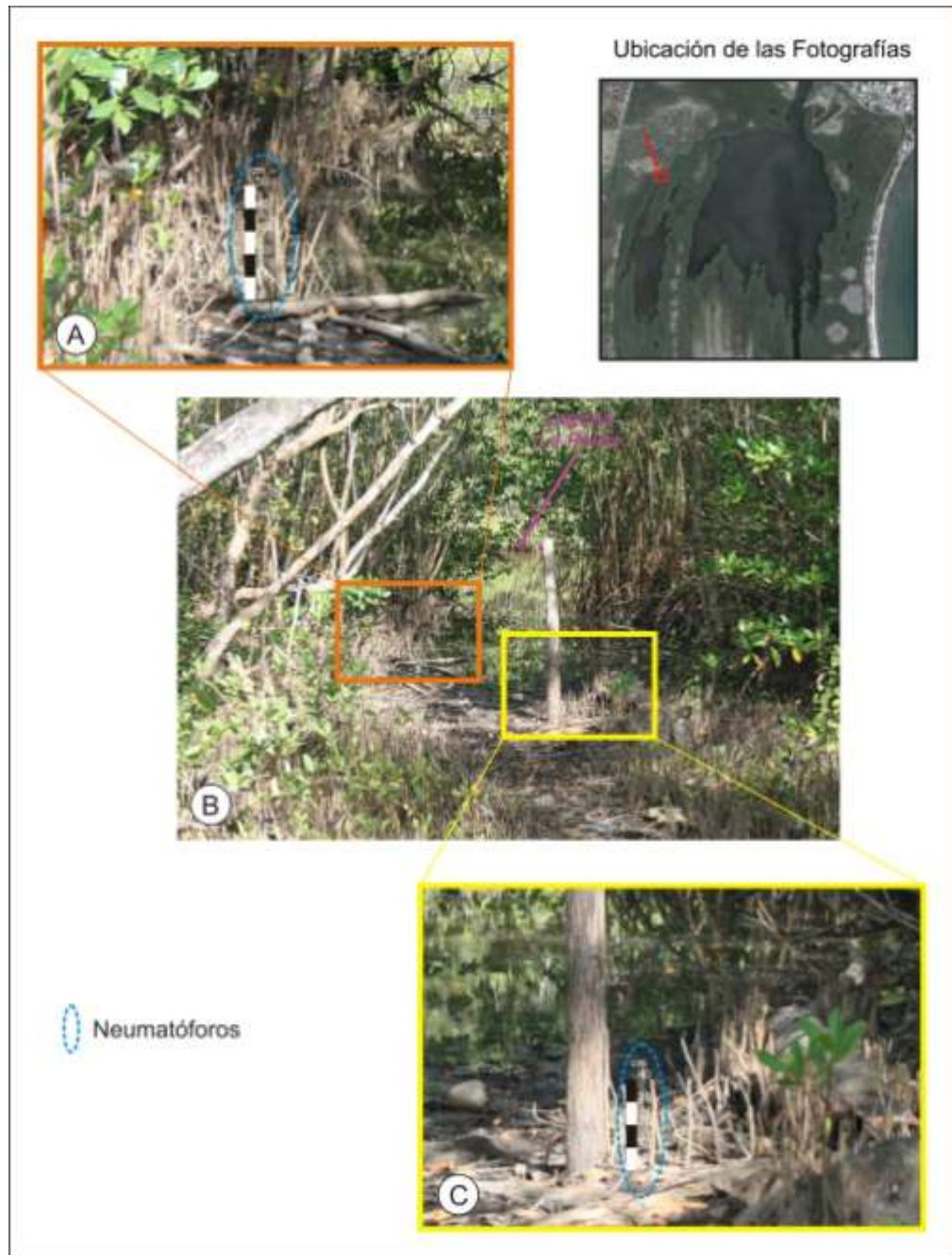


Figura 36. Medida de las mareas en la Laguna La Reina.

5.5. Mineralogía del Núcleo HSR-1

Para el estudio mineralógico del Núcleo HSR-1, se seleccionaron 7 muestras del núcleo. Donde 6 de las muestras se escogieron tomando en consideración los cambios de coloración observados y la última se escogió por la presencia de carbonato de calcio, determinada con HCl. Los difractogramas obtenidos se presentan en el Apéndice 1, junto con las fases minerales identificadas en cada uno de ellos. Los minerales presentes en los sedimentos analizados se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. Mineralogía determinada por DRX de los sedimentos del Núcleo HSR-1

Mineral	Fórmula Química
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Cuarzo	SiO_2
Illita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Bernalita	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Calcita	CaCO_3

La distribución en el Núcleo HSR-1 de la mineralogía de las muestras seleccionadas, se presenta en la figura 37. Este gráfico se construyó, con la distribución de las relaciones porcentuales de los minerales en cada muestra, obtenidos por la normalización de áreas bajo la curva, obteniendo los datos que se presentan en el Apéndice 2.

Tal como se muestra en Carrillo (2006), mediante las relaciones porcentuales de los minerales detectados en las muestras de sedimentos, estableció variaciones relativas de las proporciones cada mineral según su posición estratigráfica y de esa

manera realizó interpretaciones acerca de las condiciones del ambiente de depositación más específicamente estableció implicaciones climáticas con la información mineralógica recolectada ^[41].

De la misma manera, pueden realizarse en este estudio, interpretaciones a través de los minerales presentes en los sedimentos del Núcleo HSR-1, los cuales presentan interesantes variaciones relativas que reflejan cambios en las condiciones del ambiente de depositación como lo es el yeso, que por ser un mineral evaporítico, responde a periodos intermitentes en la laguna litoral, donde una mayor abundancia, refleja procesos en donde la evaporación supera a la precipitación, originando la presencia de este mineral, y a su vez las relaciones relativas del mismo dentro de la columna de sedimentos.

El cuarzo de igual forma, refleja las proporciones relativas del aporte terrígeno detrítico al sistema y su abundancia está relacionada de manera directamente proporcional con este aporte. La arcilla illita, no supera los 10% en ninguna de las muestras analizadas, por lo que puede considerarse como un aporte constante dentro del sistema. Y la calcita, presente en una sola muestra, corrobora la prueba realizada con HCl al 10% efectuada como un análisis complementario.

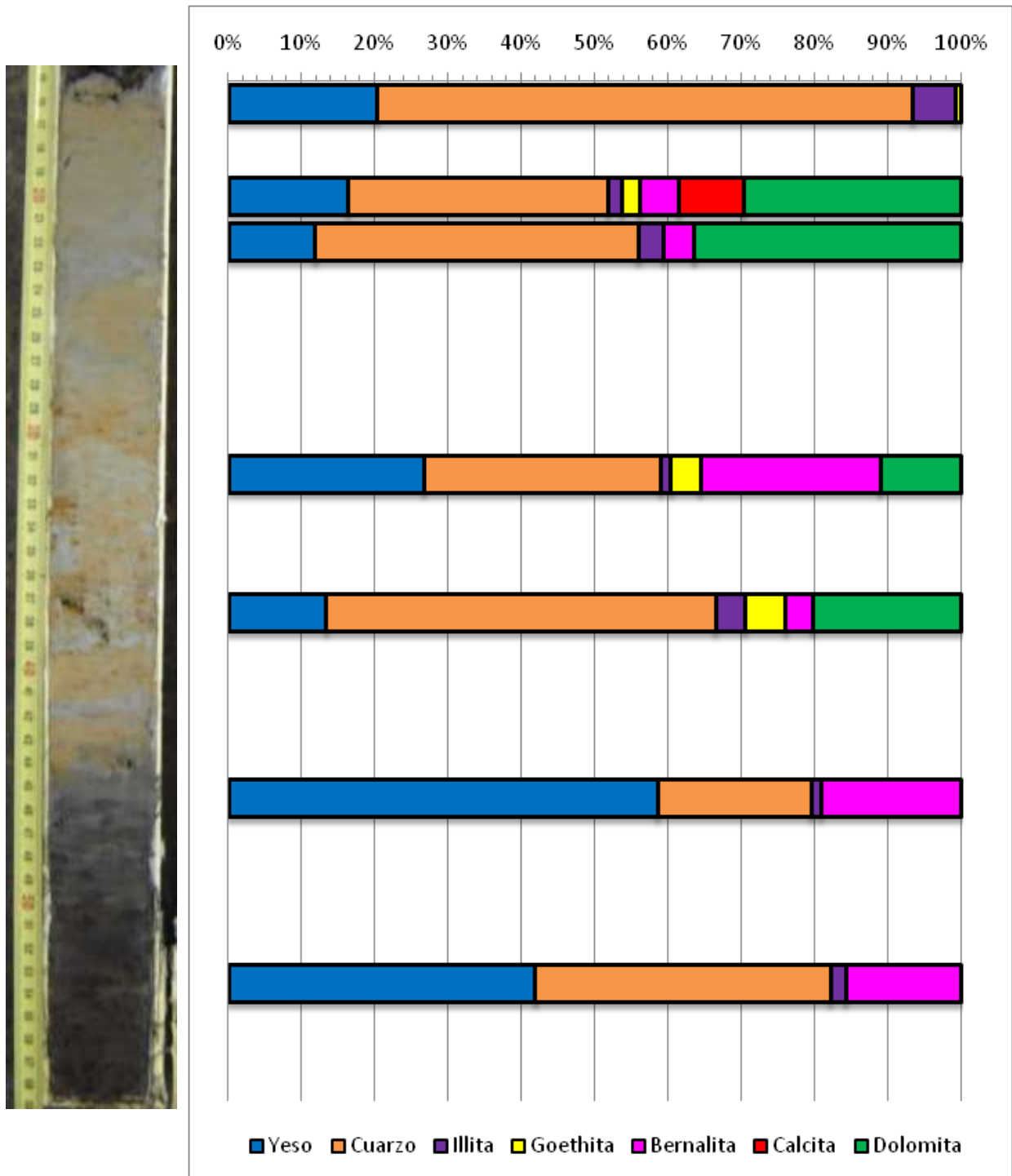


Figura 37. Distribución mineralógica en la columna.

5.6. Distribución estratigráfica de las variables estudiadas

Los elementos analizados mediante FRX, el parámetro determinado LOI y el calculado CIA, se presentan distribuidos estratigráficamente en la figura 38, en donde pueden observarse las tendencias generales de todas las variables.

El comportamiento de los elementos, representado en sus óxidos, Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 , TiO_2 , V y el parámetro CIA, presentan una tendencia similar, al tener una inflexión a 450 mm, donde sus concentraciones disminuyen significativamente. El CaO , a diferencia del grupo nombrado anteriormente, presenta un comportamiento inverso a esas variables, ya que cuando aquellas disminuyen este aumenta, por ejemplo en el punto 450 mm, además una zona 180 mm y 240 mm que presenta un aumento de este elemento, está relacionada con las mayores proporciones de calcita y dolomita.

El Fe_2O_3 , MnO , Na_2O y el LOI, no presentan esa inflexión a 450 mm característica de los elementos antes mencionados, sin embargo resaltan dos tendencias, la primera, donde el Fe_2O_3 y el MnO , aumentan en la sección desde 280 mm a 420 mm, posiblemente asociado a niveles más oxidados y la tendencia del Na_2O y el LOI sodio que presentan una disminución hacia el tope.

Estas características generales dan un primer acercamiento para la reconstrucción geoquímica paleoambiental del sistema lagunar, sin embargo, la estadística descriptiva y multivariada, permitirá con más certeza descifrar la historia preservada en el Núcleo HSR-1.

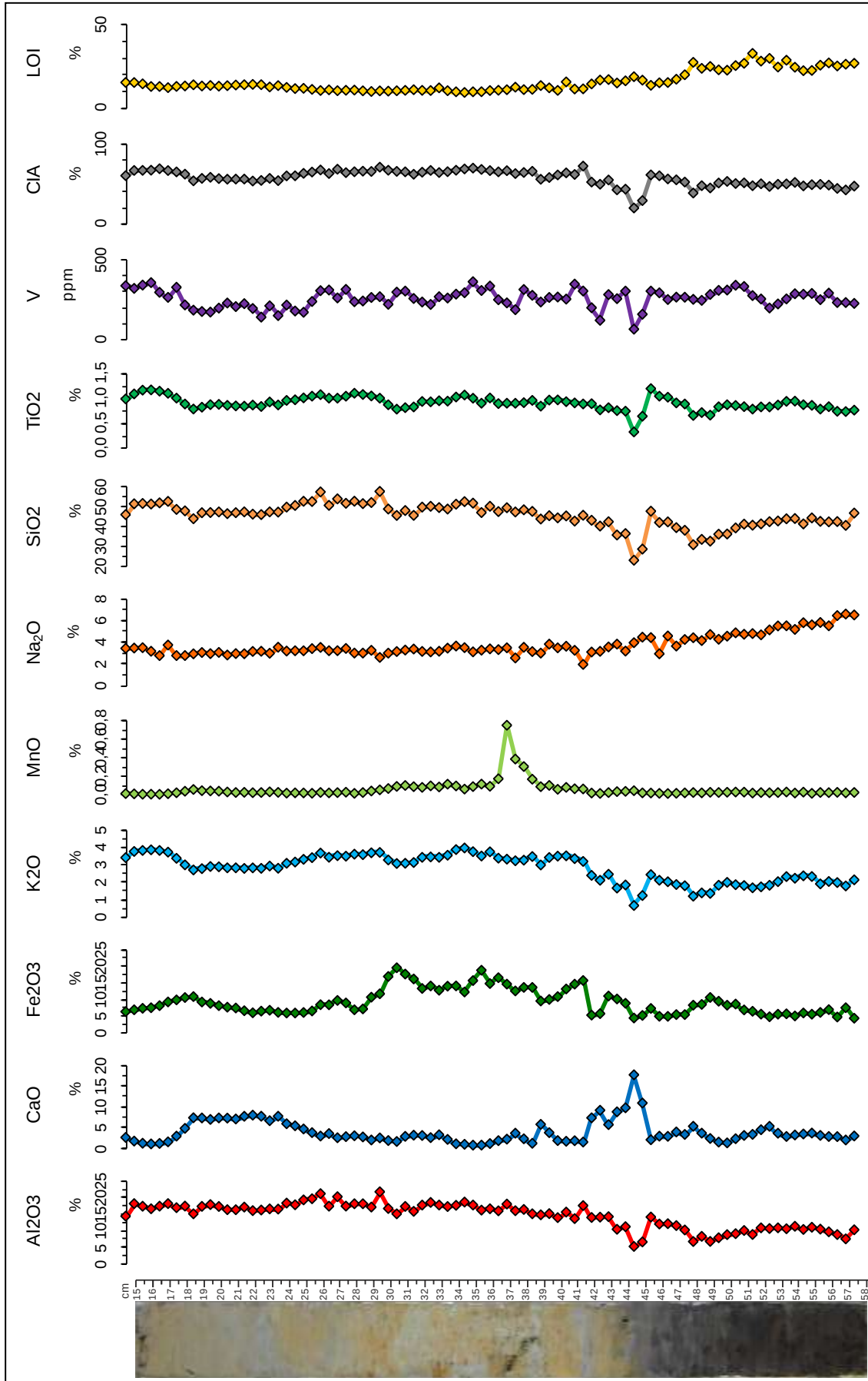


Figura 38. Distribución estratigráfica de todas las variables.

5.7. Tratamiento estadístico de los datos obtenidos y pruebas de normalidad.

Una vez determinadas las concentraciones de las variables de interés, presentes en el Apéndice 3, se realizó el tratamiento estadístico de los mismos, teniendo especial interés en la muestra que se trató por triplicado, precisamente con este fin. Por lo que se procedió a calcular con el programa Microsoft Excel 2007, el promedio, la mediana, la desviación estándar, el valor máximo y mínimo, el coeficiente de variación y el límite de confianza al 95% para la muestra HSR-1-440, la cual fue escogida mediante el uso de generador de números aleatorios, disponible en la página web www.random.org. Los datos obtenidos para este análisis se presentan en el Apéndice 4.

Teniendo valores de precisión que varían desde el 2% hasta el 14% para los elementos Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , Si_2O , Ti_2O y Na_2O . Seguidos de 27% para el MnO y 49% para V. Y valores de 8%, 11% y 23% para los parámetros CIA, Humedad y LOI respectivamente.

Para evaluar la exactitud del método analítico empleado, se compararon los valores del material MCAF (Muestra Compuesta de Arcillitas de Falcón) que ha sido denominada como un candidato a material de referencia. Para el cual se han obtenido datos aceptados estadísticamente en cuanto a su homogeneidad química y física, pudiendo ser utilizado, intralaboratorios en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la UCV ^{[42] [43] [44]}.

Los datos determinados por triplicado de MCAF mediante la técnica de FRX, se evaluaron y compararon con los datos reportados ^{[43] [44]}, considerados como valores teóricos, analizados mediante la técnica ICP-OES y se calculó el error relativo absoluto, teniendo así una medida de la exactitud de la técnica empleada, destacando el hecho de que el tratamiento de la muestra llevado a cabo en cada caso es distinto, siendo para FRX, una medida directa en el sedimento sólido, pulverizado y homogenizado, y

en ICP-OES, medido en solución, luego de una fusión de los sedimentos con una mezcla de boratos de litio y disolución ácida.

Los resultados obtenidos ubicados en el Apéndice 5, presentan variaciones dependiendo del elemento que se esté analizando. Donde se tiene un error aceptable para los elementos CaO , Fe_2O_3 , MnO , K_2O , Ti_2O y V , entre el 3% y 17%, considerando que las mediciones fueron hechas mediante la técnica de FRX.

Para el Na_2O , se tiene un error bastante alto, 196%, estando asociado a las diferencias en las técnicas analíticas empleadas para cada análisis, ya que en este trabajo, se determinó este elemento mediante la técnica AES mientras que en los trabajos realizados con MCAF^[43] ^[44], se determinó mediante ICP-OES. Dando ésta diferencia, motivos para que se evalúe nuevamente los valores de referencia de MCAF, en vista de que la técnica más apropiada para determinar las concentraciones de estos elementos es mediante AES, porque es las interferencias al detectarlo son menores. A pesar de esta diferencia en los valores, el elemento Na_2O no se descartó en el análisis realizado, ya que este presenta variaciones quimioestratigráficas con buena correlación y permite hacer las interpretaciones geoquímicas de interés.

Para el Si_2O y Al_2O_3 , se tienen errores relativos de 27% y 54% respectivamente, considerados altos, al comparar las diferencias de las técnicas analíticas utilizadas, en este caso, debe someterse a revisión si se desean valores más exactos, las concentraciones determinadas por la técnica de FRX, ya que al realizar la suma total de los óxidos, se comprueba, que se están sobre estimando las concentraciones de los mismos. Al igual que el Na_2O , estos dos elementos se mantuvieron dentro de las interpretaciones realizadas.

Para la determinación de las distribuciones de las variables estudiadas, se utilizó el programa STATISTICA 9, con el cual se construyeron para cada una de las variables,

sus respectivas cajas graficas, mostradas en el Apéndice 6, como también los histogramas de cada uno de ellos, presentes en el Apéndice 7, que permitieron visualizar las distribuciones y detectar los valores anómalos.

Además de las representaciones graficas, para corroborar los resultados, se llevó a cabo la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, la cual para cada valor de N (numero de muestras) y dependiendo del intervalo de confianza, se calcula el valor critico D, el cual se compara con el valor D calculado, considerando que la población de datos tiene una distribución normal, cuando el valor D calculado es menor que el valor D critico, para con un nivel de confianza determinado. Los resultados de este test de normalidad, se presentan en el Apéndice 8.

Una vez realizada esta prueba de normalidad, en las variables que no presentaron una distribución normal, fueron sustituidos los valores anómalos por la mediana recalculada depurada, para asegurar el comportamiento normal de los datos. A pesar de hacer esta sustitución, no se llegó a obtener un comportamiento normal. En vista de la situación, se consideró utilizar los datos crudos, ya que corresponden a los valores reales, siendo importante mantenerlos sin alteraciones al realizar interpretaciones geoquímicas a través de los perfiles quimioestratigráficos.

6. Análisis de resultados

Con la finalidad de realizar un estudio paleoambiental, se agruparon los atributos químicos analizados, una vez comprobado que tienen un comportamiento normal, se realizaron asociaciones elementales, mediante la estadística multivariada utilizando el programa MVSP 3.13r, para construir dendogramas con los datos estandarizados, a partir del método de agrupamiento de WPGMA (método ponderado par-grupo que utiliza promedios ponderados), medido con la distancia euclidiana, la cual representa la distancia geométrica en el espacio multidimensional. Obteniendo relaciones de datos que son homogéneos entre cada grupo y disimiles entre grupos, que para este trabajo, se muestra en la figura 39, la cual es el resultado del agrupamiento libre de las variables de interés.

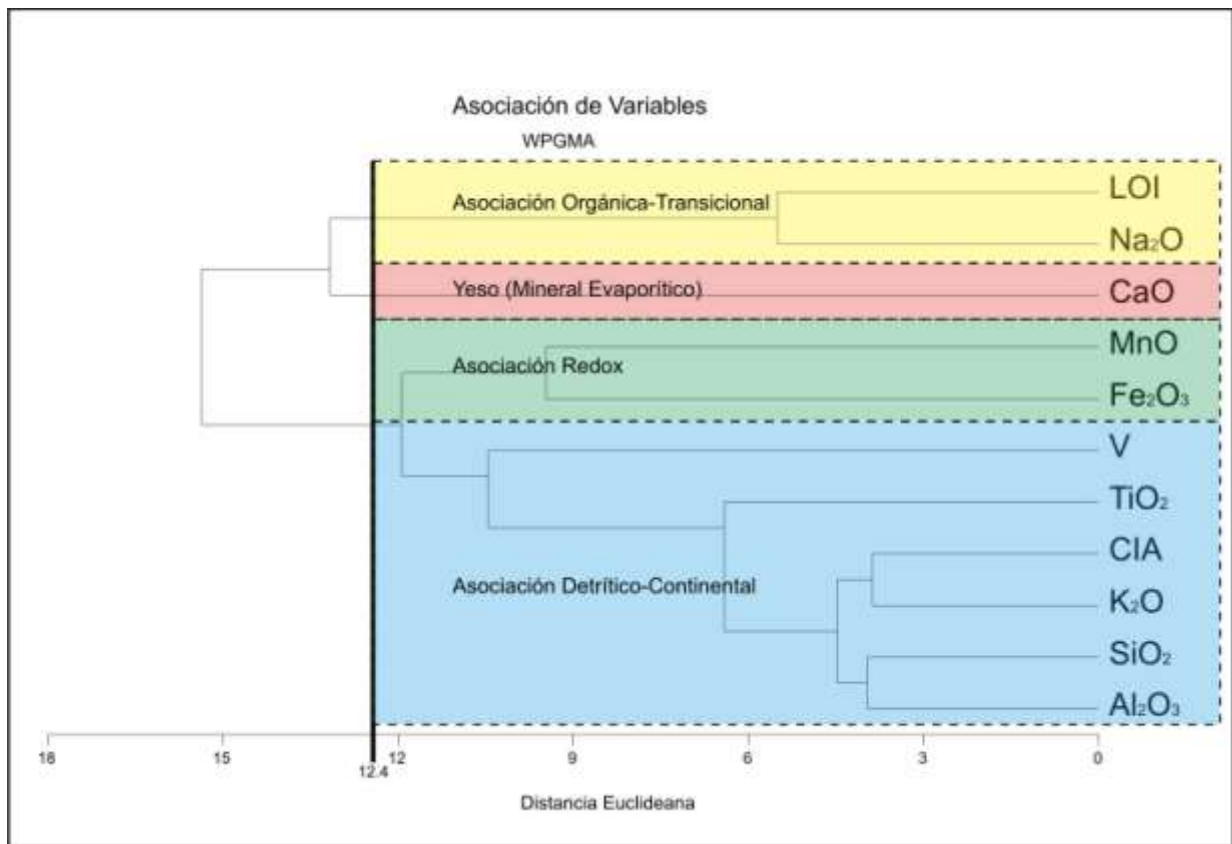


Figura 39. Asociación de Variables.

De las agrupaciones obtenidas, se distribuyen 4 asociaciones, en donde la primera, la Asociación Orgánica-Transicional correlaciona el Na_2O y el parámetro LOI, la segunda es la Asociación Redox que involucra al Fe_2O_3 y al MnO , seguida de una tercera, la Asociación Detrítico-Continental agrupando al Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CIA, TiO_2 y V. El elemento CaO , no se asocia estadísticamente con ninguna otra variable estudiada, por lo que quedó como un parámetro individual, que será interpretado como Yeso (Mineral Evaporítico).

Cada asociación en particular, a través de las interpretaciones de los elementos que la conforman, brinda información acerca de los procesos ocurridos durante la depositación de los sedimentos en un ambiente determinado. Siendo una de las herramientas disponibles la determinación de las quimiofacies dentro de las asociaciones ya definidas, para mostrar las variaciones de los elementos asociados dentro del sistema y poder establecer con mayor certeza los cambios en los procesos involucrados. Y es mediante la estadística multivariada de agrupamiento restringido que se obtienen las quimiofacies, estableciendo los límites de cada una de ellas.

Una vez establecidas las asociaciones geoquímicas, seguido de la determinación de las quimiofacies para cada una de ellas, se presentan los perfiles quimioestratigráficos en donde se muestra la distribución de las concentraciones de los elementos según la posición estratigráfica de la muestra, junto con la curva de acumulación porcentual, en la cual normalizan las concentraciones del elemento y se distribuyen en una escala del 0 al 100 % conforme se avanza de base a tope en la columna y el perfil mineralógico.

Asociación Orgánica-Transicional

Esta asociación relaciona las variables Na_2O y LOI, presente en la figura 40, las cuales mediante un corte euclidiano a 1,8 se obtienen dos quimiofacies:

Quimiofacie Orgánica-Transicional 1, ubicada desde la base 580 mm hasta el límite en 485 mm.

Quimiofacie Orgánica-Transicional 2 ubicada desde el límite en 485 mm hasta el tope de la secuencia a 150 mm.

Se puede observar en la figura 41, las distribuciones de los perfiles quimioestratigráficos de los elementos presentes, junto con sus curvas de acumulación porcentual y el perfil mineralógico, mostrando además las quimiofacies asociadas.

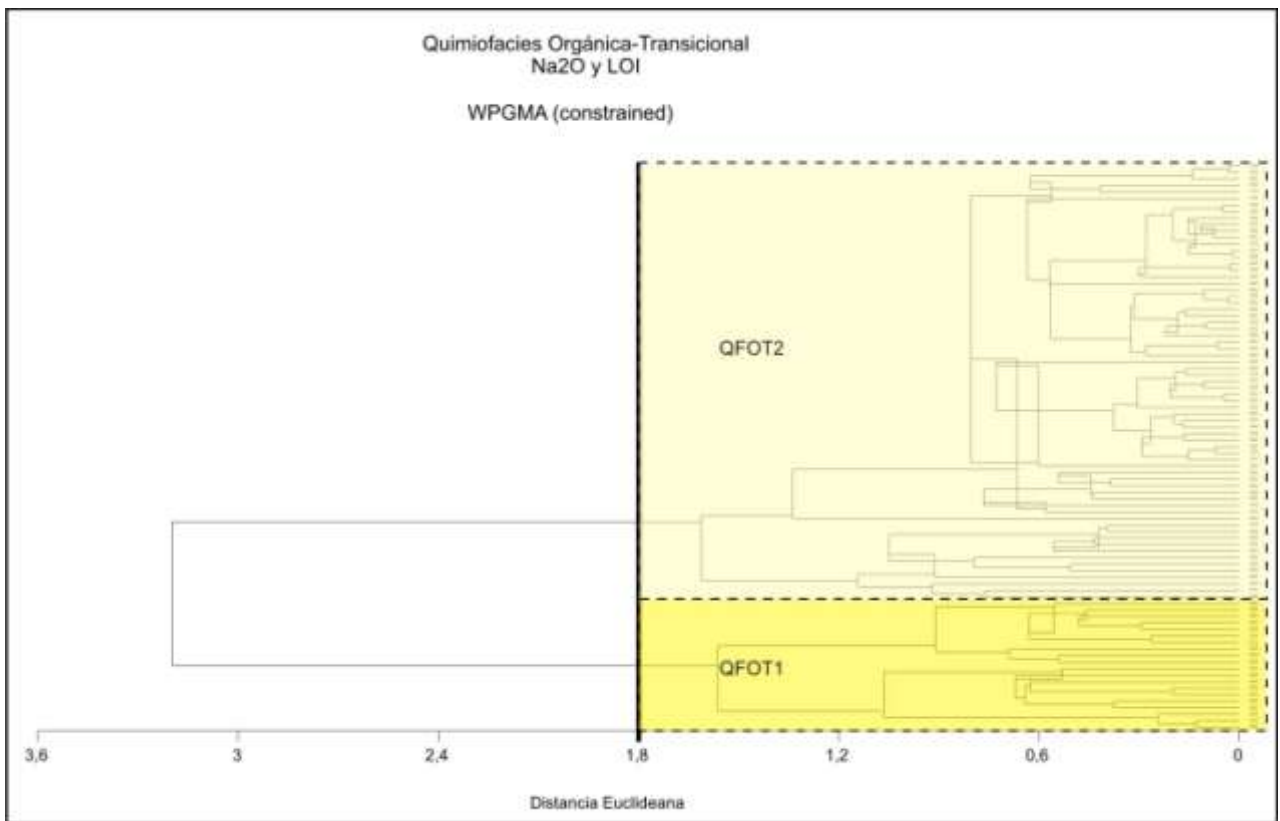


Figura 40. Asociación Orgánica-Transicional.

En la sección de la base correspondiente a un paleosuelo de un bosque de manglares, presenta las siguientes evidencias que permiten afirmar su procedencia, la coloración que presenta marrón rojiza es característica de los taninos presentes en los suelos de manglares *Rhizophora Mangle*, la presencia de restos de raíces además de la presencia del suelo fibris que son importantes ya que protegen las costas de erosión y en algunos casos de amenazas naturales como tormentas y tsunamis donde grandes cuerpos de agua invaden la tierra.

Al detallar la sección al tope de este paleosuelo, se observa una sección compuesta por intercalaciones de sedimentos finos de colores gris claro y gris oscuro, lo cual brinda una valiosa información referente al proceso ocurrido en donde cambiaron las condiciones paleoambientales del sistema, siendo el reflejo de dos hechos principalmente, uno, que la muerte del bosque de manglares fue debida a un aumento en la sedimentación y por otro lado, la coloración grisácea, la intercalación de las laminas y los valores de LOI son el reflejo de un aporte de materia orgánica remanente, proveniente de las hojas caídas de los mangles muertos, sucediendo esto una vez muerto el manglar.

Además se tiene otra fuente de información fundamental, obtenida del perfil de Na_2O , el cual refleja una disminución hacia el tope, indicando una disminución del aporte marino al sistema. Durante la sección del paleosuelo las condiciones de salinidad presentes permitieron su formación, una vez muerto el manglar, la señal correspondiente al Na_2O , de las hojas caídas y mezcladas con sedimento disminuyen las concentraciones de Na_2O , coincidiendo estos datos con el hecho de que las hojas de *Rhizophora Mangle* no acumula sal por ser ultrafiltradoras mientras que las raíces sí concentran las sales. A diferencia de la especie *Avicennia germinans* la cual presenta un comportamiento contrario, acumula sal en las hojas y no en las raíces.

Y son este conjunto de características que permiten afirmar que la información recolectada en el núcleo, corresponde a un paleosuelo de bosques de manglares y más específicamente de la especie *Rhizophora Mangle*. Un cambio abrupto en el sistema, posiblemente promovido por un movimiento tectónico, generó la desconexión súbita con el ambiente marino, generando una predominancia en el aporte de sedimentos por fuentes terrígenas, lo que ocasionó la muerte súbita del bosque de manglares, y posteriormente la colmatación por aporte de sedimentos detríticos continentales a la laguna litoral para finalmente quedar desactivado el sistema. Y actualmente estar sólo inundado este sistema en periodos de lluvia.

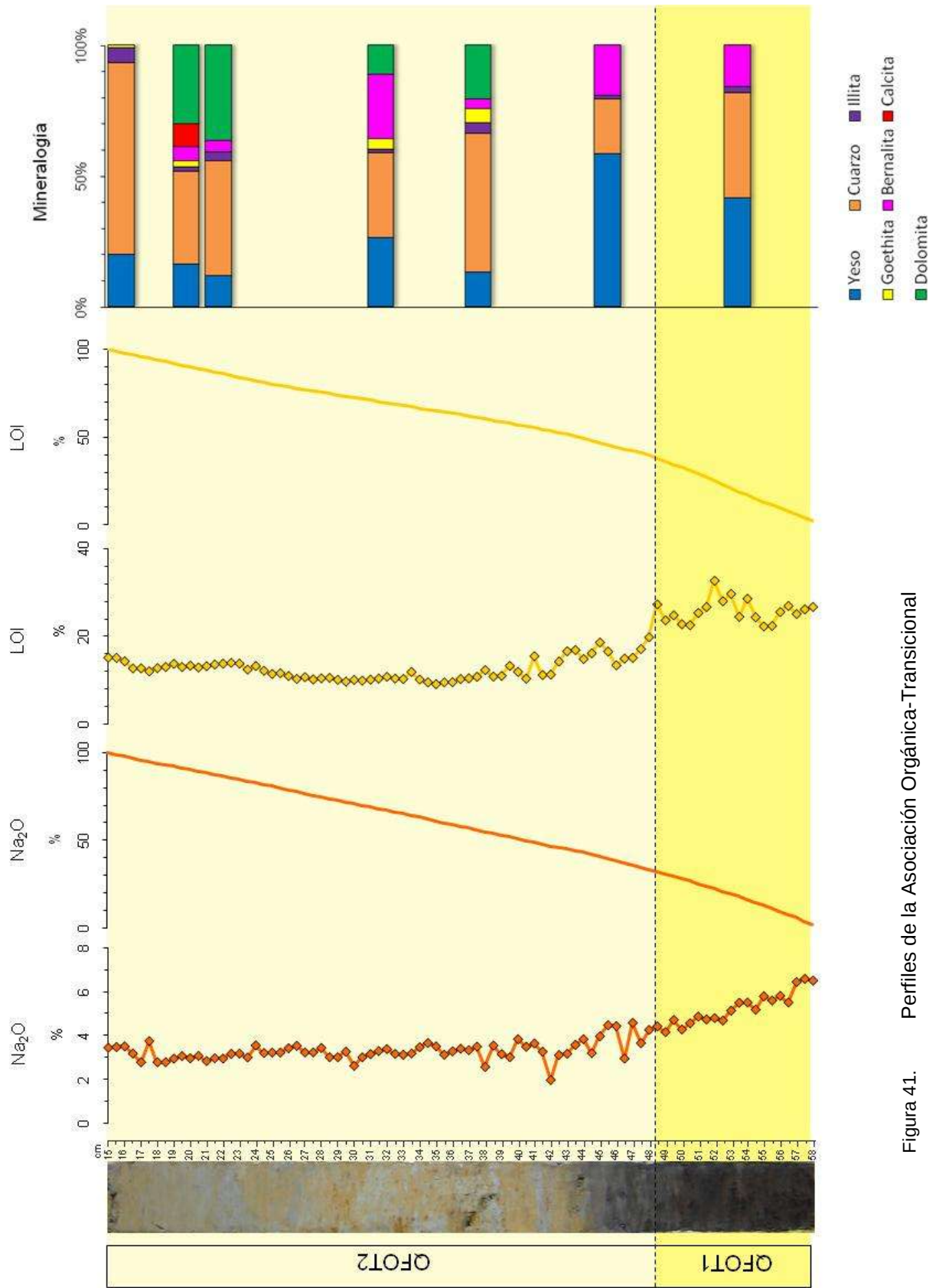


Figura 41. Perfiles de la Asociación Orgánica-Transicional

Asociación Redox

Esta asociación correlaciona las variables Fe_2O_3 y MnO , mostrada en la figura 42, que a través de un corte euclidiano a 4 se obtienen dos quimiofacies:

Quimiofacie Redox 1, ubicada desde la base 580 mm hasta el límite en 375 mm.

Quimiofacie Redox 2, ubicada desde el límite en 375 mm hasta el tope de la secuencia a 150 mm.

En la figura 43, se presentan las distribuciones de los perfiles quimioestratigráficos de los elementos asociados, las curvas de acumulación porcentual y el perfil mineralógico obtenido, resaltando las asociaciones de las quimiofacies.

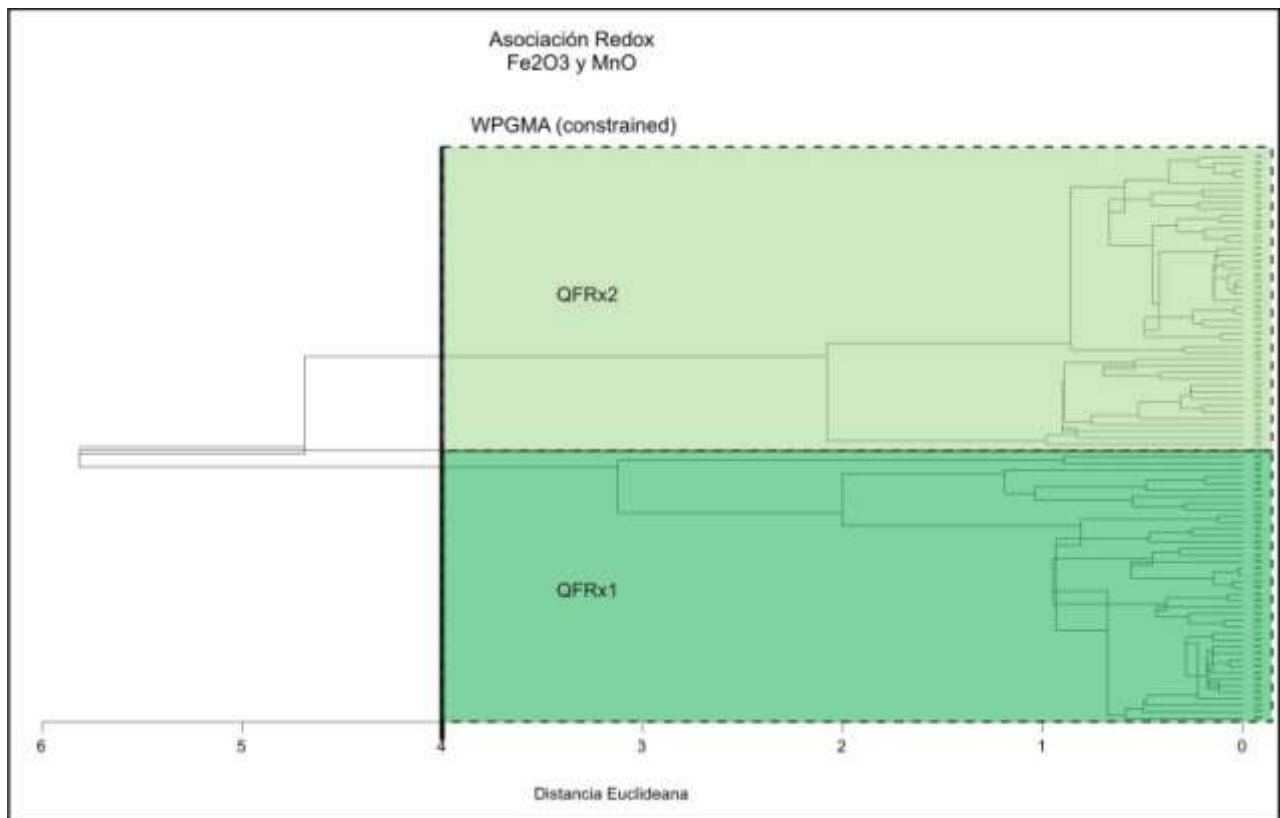


Figura 42. Asociación Redox.

Se observa a través del manganeso, un cambio abrupto dentro de las quimiofacies definidas, se presentan pequeñas variaciones menores, que representan cambios sutiles en las condiciones redox. Pero hay un cambio importante a 375 mm. Y los cambios se manifiestan a medida que se va pasando de condiciones subóxicas de una laguna transicional donde hay menos oxígeno que arriba donde las condiciones son óxicas.

El vaciado de la laguna o el retiro del agua marina, en el manglar se manifiesta de manera rápida, y las condiciones redox para Fe y Mn, responden los dos elementos pero a distintas alturas, tiempo después del retiro del agua, hay un cambio importante en las condiciones redox del sistema, cuando se interpreta que se retira el mar y se seca la laguna, origina la muerte del manglar, los seres vivos responden más rápido a cambios ambientales y los cambios químicos se manifiestan más tarde, como respuesta a cambios de las condiciones subóxicas a óxicas.

Niveles de oxidados, producidos por la bioturbación posterior a la depositación de los sedimentos, origina otra fuente de minerales de óxidos de hierro y manganeso, presentes también en el registro sedimentario. Sin embargo por ese esto, el producto de procesos posteriores a su formación, el aporte que brindan es adicional a la reconstrucción paleoambiental, siendo una medida de las condiciones recientes del sistema lagunar.

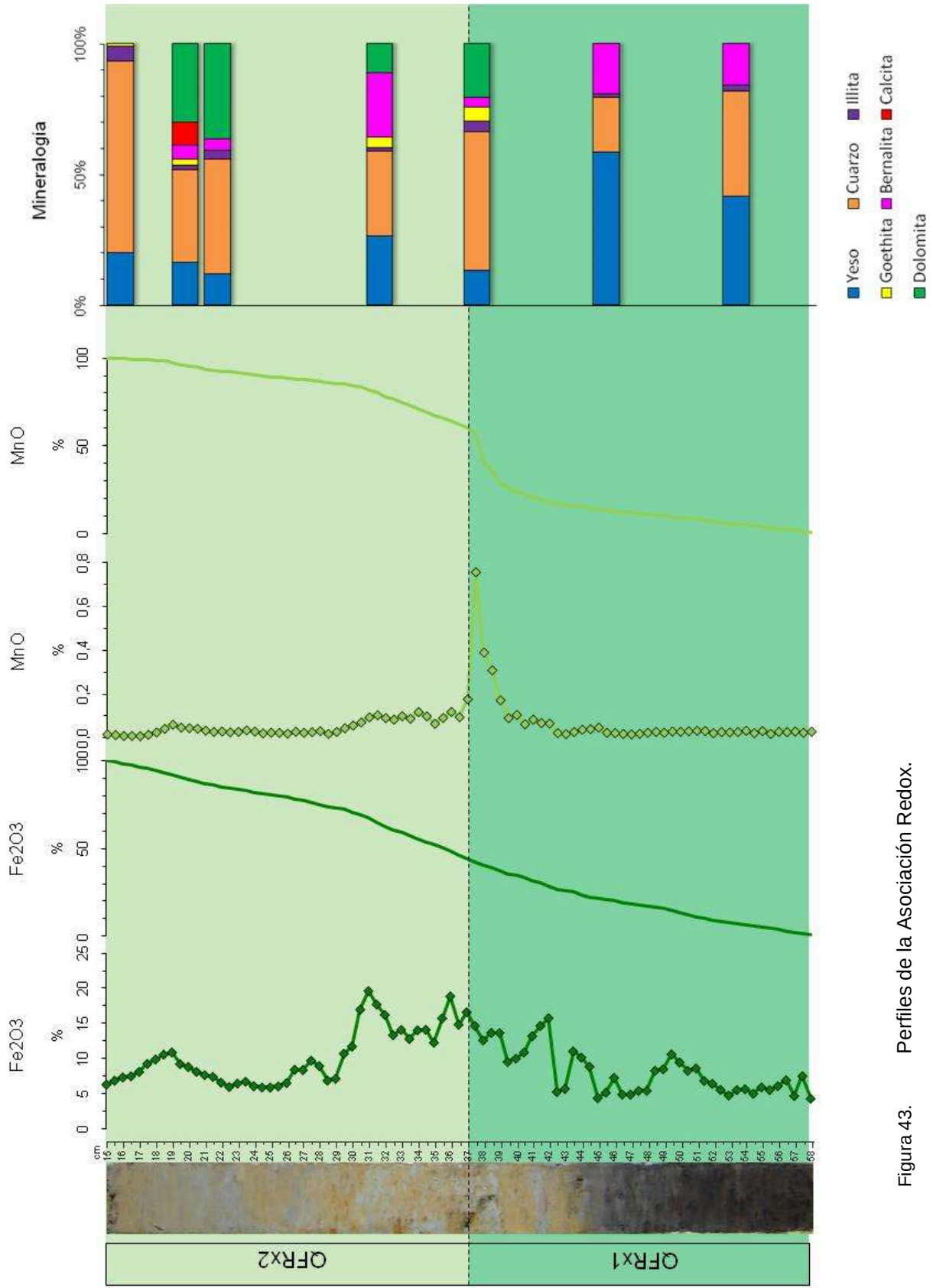


Figura 43. Perfiles de la Asociación Redox.

Asociación Detrítico-Continental

Finalmente esta asociación correlaciona las variables SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , V y CIA, las cuales se pueden observar en la figura 44, que a través de un corte euclidiano a 4,8 se obtienen dos quimiofacies:

Quimiofacie Detrítico-Continental 1, ubicada desde la base 580 mm hasta el límite en 460 mm.

Quimiofacie Detrítico-Continental 2, ubicada desde el límite en 460 mm hasta el tope de la secuencia a 150 mm.

En la figura 45, se muestran los perfiles quimioestratigráficos de los elementos de esta asociación, sus curvas de acumulación porcentual y el perfil mineralógico, donde las quimiofacies asociadas también están presentes.

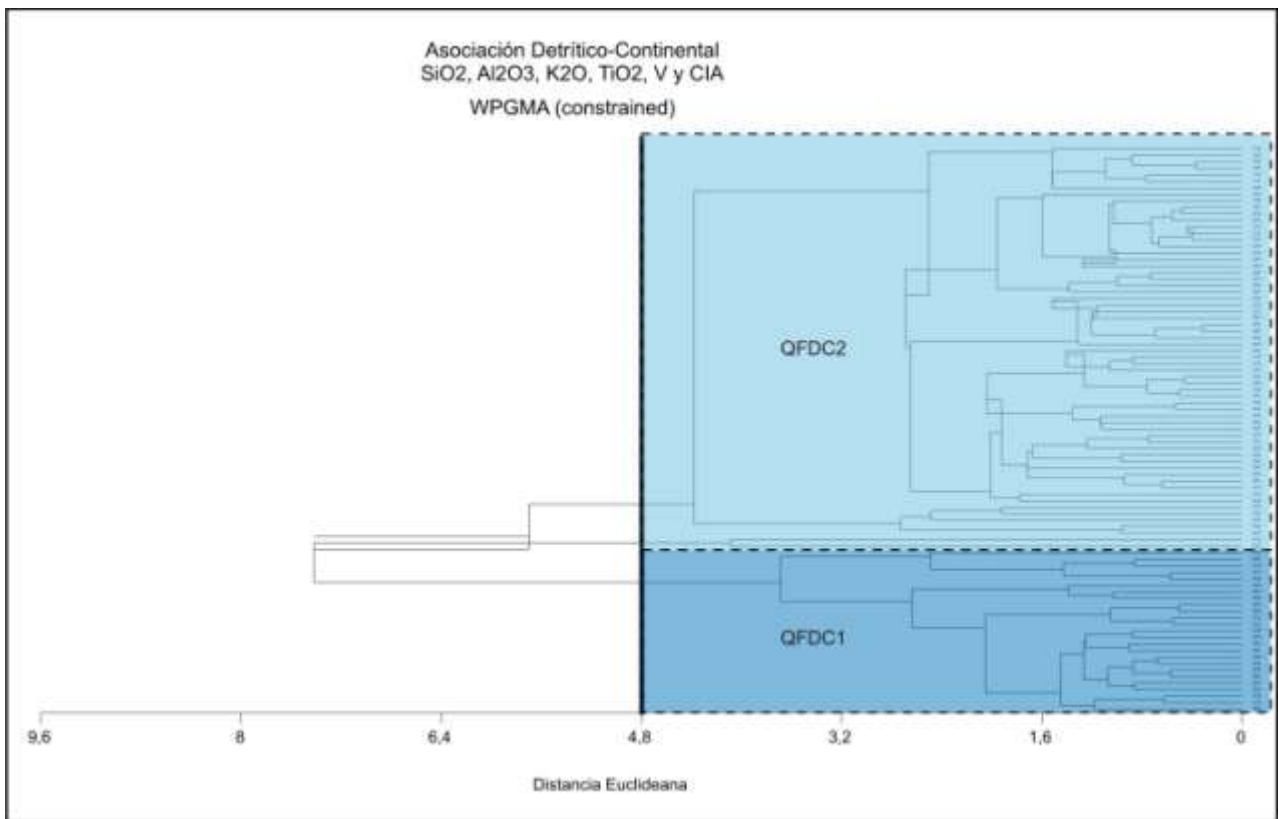


Figura 44. Asociación Detrítico-Continental.

Los cambios en el perfil, cambios en la pendiente, están ubicados en la zona de transición, donde inicialmente la sedimentación está controlada por un ambiente de laguna, a una sedimentación controlada más por un ambiente continental. Por ríos arroyos o escorrentía. Esta quimiofacie está controlada por la presencia del paleosuelo, ya que el aporte detrítico, varía significativamente según las condiciones ambientales, teniendo menor influencia donde el ambiente es marino transicional y pasando a tener una gran importancia cuando se trata del ambiente continental.

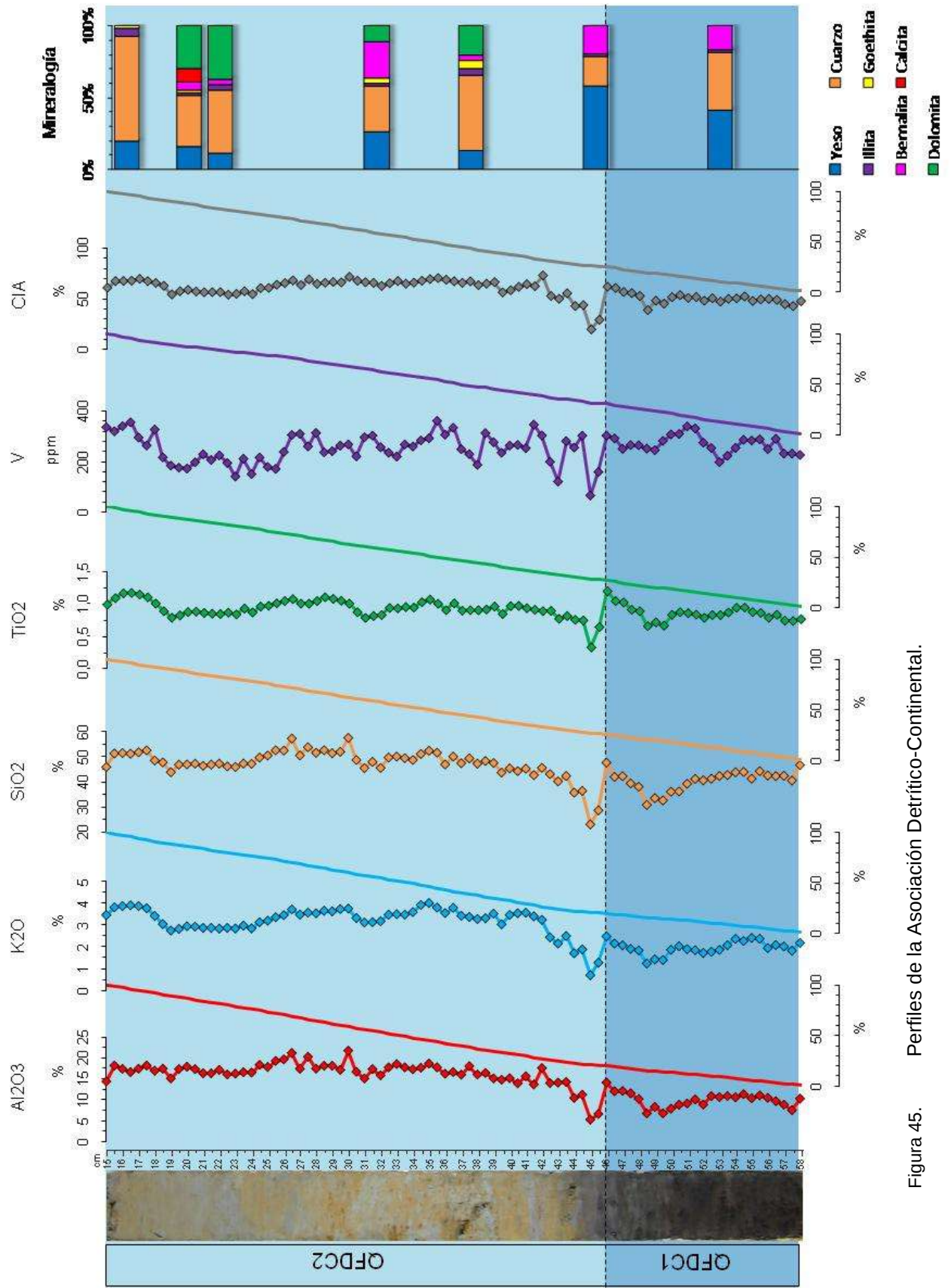


Figura 45. Perfiles de la Asociación Detrítico-Continental.

Respecto al perfil del calcio mostrado en la figura 46, prácticamente todo el comportamiento está controlado por la presencia de yeso, en toda la columna, entre 180 mm y 240 mm, el aumento puede explicarse por la presencia de la calcita y dolomita, que es la zona en donde las concentraciones relativas son mayores de estos minerales. Pudiéndose tener mejores interpretaciones, conociendo las concentraciones de Mg, el cual no se pudo determinar en este estudio.

A pesar de ser una sola variable, se pueden interpretar varias cosas, que hay la presencia de condiciones ambientales evaporíticas. Donde el retiro de la laguna, propicio la muerte del manglar que queda en el registro anterior y la laguna al secarse genera un intervalo de minerales evaporíticos, a partir de ese momento, se comienza a depositar principalmente sedimentos de origen terrígeno, con minerales como cuarzo, illita, goethita y bernalita.

Los minerales evaporíticos, no sólo el yeso, pueden presentarse en esos niveles donde las condiciones climáticas favorecen la precipitación de los mismos, así como el caso donde se observa un aumento brusco. En la sección del paleosuelo, hay minerales evaporíticos que pudieran estar asociados a periodos de la laguna, interanuales, de sequias y de lluvia, pero ahí en ese caso el manglar no muere. La presencia del yeso predomina donde hay influencia marina.

El suelo actual presente en el núcleo, es el resultado de la actividad correspondiente a la presencia de herbazales, siendo estos los que predominantemente están controlando la composición de la materia orgánica actual.

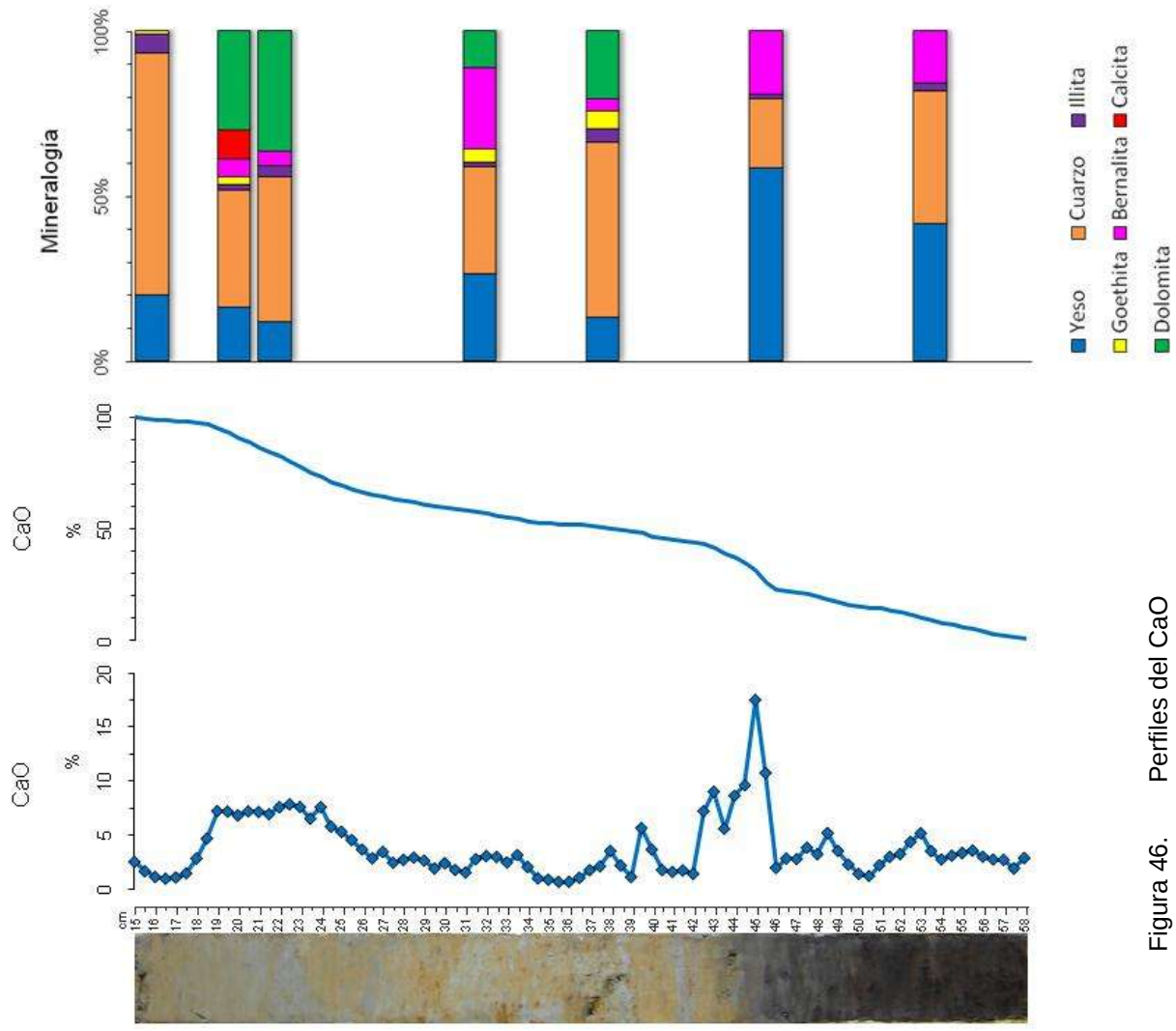


Figura 46. Perfiles del CaO

Respecto a la precipitación de Halita (NaCl), reflejada en los perfiles quimioestratigráficos a través del Na₂O, no pudo ser detectada mediante la técnica de Difracción de Rayos X empleada, que posee un límite de detección de alrededor del 5%, por lo tanto como se estima que las proporciones de halita se encuentren por debajo de este valor, según las concentraciones del Na₂O, se puede determinar que este mineral no fue detectado mas sin embargo no se descarta su presencia.

Las fluctuaciones de los valores de LOI y humedad, en la sección correspondiente al paleosuelo del bosque de manglares, son la señal típica del comportamiento de los manglares controlados climáticamente, ya que estos presentan diferentes respuestas a los periodos de lluvia y sequía. Siendo los periodos más húmedos los propicios para la generación de suelo, produciendo mayor cantidad de raíces, acumulando más materia orgánica y absorbiendo en las raíces más agua, en comparación a los periodos más cálidos, donde las condiciones son más secas.

Los bosques de manglares de la especie *Rhizophora Mangle*, se sitúan en la parte de atrás de las lagunas costeras, ya que necesitan aporte de agua dulce, proveniente de ríos y quebradas. Esta especie se caracteriza por ser formadora de suelo fibris, que contiene raíces compuestas por taninos. Un bosque de manglares de esta especie muere a causa de dos posibles razones, principalmente una de ellas corresponde al aumento de la sedimentación en el sistema, lo que impide la respiración del suelo por la carga de sedimentos que tiene por encima. Y por otra parte está el estancamiento del agua, generado básicamente por el desvío del curso de agua de las afluentes a la laguna, promoviendo una mayor acumulación de los niveles de salinidad que llevan al mangle a su muerte ya que esta especie no tolera valores de salinidades mayores a 65 ups.

7. Reconstrucción Paleoambiental

Una vez realizados los análisis geomorfológicos y geoquímicos, contemplados en este estudio, se establece un modelo evolutivo en la figura 47 para la paleolaguna litoral ubicada en el Sistema Lagunar de Higuero, la cual fue el objeto de interés.

Se propone que inicialmente el sistema lagunar se encontraba en condiciones normales, en donde la laguna tenía constante contacto con el mar a través de la infiltración por la barrera litoral, de igual forma un aporte continental mantenía el equilibrio, permitiendo el desarrollo de un ecosistema de bosques de manglares de la especie *Rhizophora Mangle*, la cual es formadora de suelo y acumuladora de sales en las raíces.

Seguido de esto, la laguna se desconectó del mar de manera abrupta, ocasionando la muerte súbita de los ecosistemas naturales, que por ser seres vivos son los primeros en responder ante los cambios bruscos en estos sistemas acuáticos. Dando paso a una mayor predominancia del aporte terrígeno continental, permitiendo el inicio de una sedimentación clástica, que debido al remanente presente de materia orgánica, proveniente de las ramas y hojas de los manglares muertos, se conserva aun un contenido orgánico en esta sección, la cual disminuye hacia el tope de la sección.

Una vez agotado el aporte orgánico en el sistema, la sedimentación clástica terrígena domina en la paleolaguna, la cual posee características de laguna intermitente, donde los periodos de evaporación y precipitación pasan a tener mayor importancia, siendo estos, los parámetros que controlan la presencia de minerales evaporíticos en el sistema, como lo es el yeso.

El aporte de sedimentos continentales al sistema continuó hasta colmatar completamente la laguna litoral, generando la planicie lagunar con un suelo actual controlado por la vegetación herbácea presente.

Durante la evolución holocena de la paleolaguna, el nivel del mar ha ido aumentando constantemente, siendo la alta tasa de sedimentación la que tenga mayor importancia en el sistema, permitiendo la formación de sistemas de cordones litorales arenosos, los cuales generan una progradación de la línea de costa a pesar del aumento del nivel del mar.

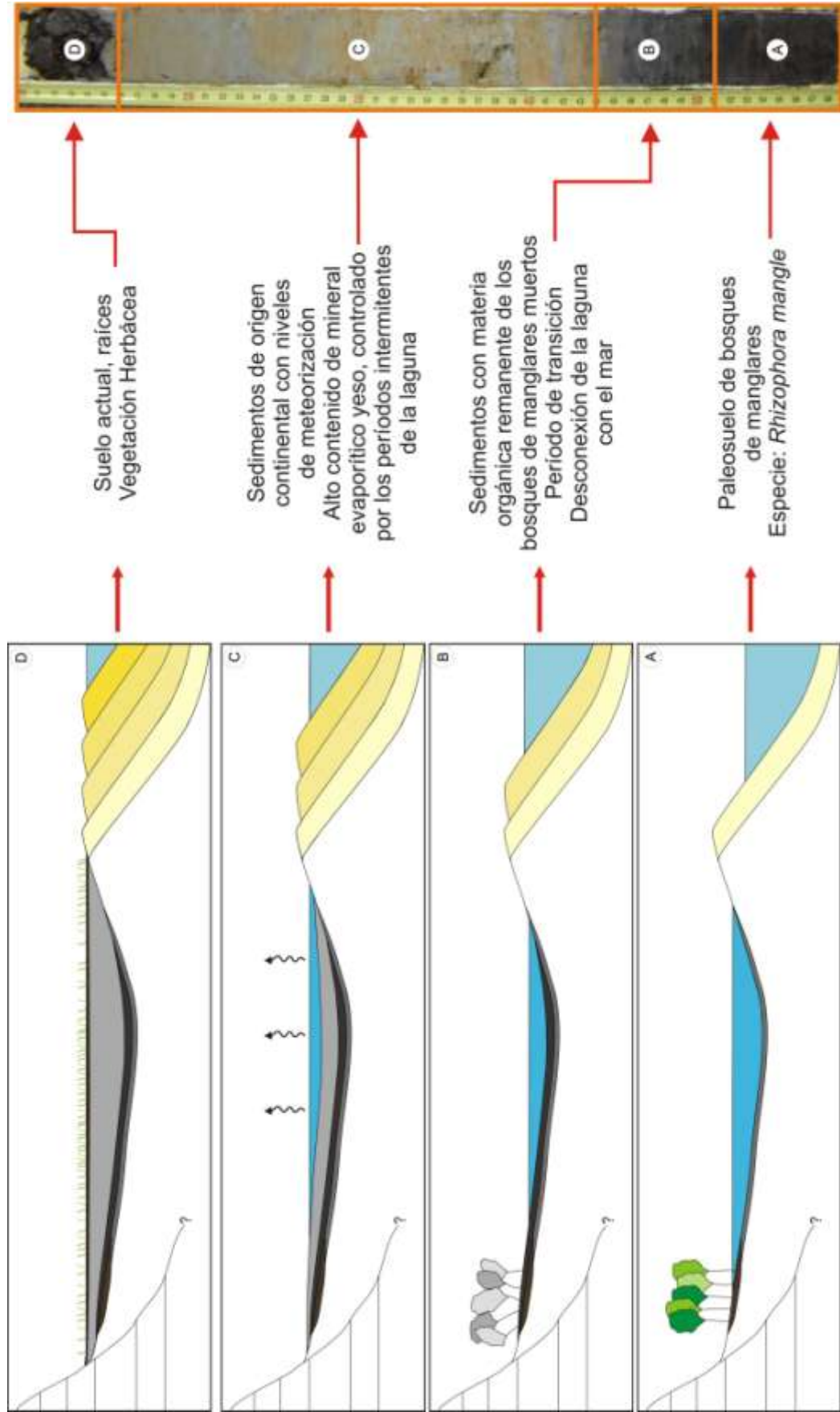


Figura 47. Reconstrucción Paleambiental de la Planicie Lagunar de Higuero. Se muestra la evolución de la paleolaguna, iniciando en A, seguido de B, C y por último D. Y su relación en cada etapa con el registro sedimentario recuperado en el Núcleo HSR-1.

8. Conclusiones

La evolución geomorfológica reciente indica que la planicie lagunar, se inunda solo en periodos de lluvia por el aporte de aguas de escorrentías. Los canales de mareas preservados en el cordón litoral arenoso, muestra que el mar ha tenido invasiones a la paleolaguna. El impacto antrópico en los últimos 50 años, ha sido el responsable del cambio del curso natural de las quebradas, la destrucción de los cordones litorales y el relleno del sistema lagunar activo.

El estudio quimioestratigráfico realizado, indica la presencia del calcio como elemento sin correlacionar y 3 asociaciones elementales, caracterizadas por condiciones orgánica-transicional, redox y detrítico-continental.

Las quimiofacies presentes en el registro sedimentario recuperado en el Núcleo HSR-1, están controladas principalmente por la presencia del paleosuelo de bosques de manglar de la especie *Rhizophora mangle* y la acumulación de sedimentos detríticos.

Las condiciones ambientales del sistema paleolagunar cambiaron de manera abrupta, ocasionando la muerte súbita de los manglares, posiblemente por movimientos tectónicos locales, que generó el vaciado de la laguna y la desconexión de la influencia marina. Inicialmente el ambiente era transicional, caracterizado por una laguna litoral, la cual posteriormente se transformó a un ambiente continental donde predominó la sedimentación clástica, hasta colmatarla.

9. **Recomendaciones**

Datar los paleosuelos de manglar con ^{14}C .

Analizar los elementos, C, N, S y P al igual que las trazas, para reconstruir con más detalle la evolución paleoambiental de la zona, utilizando la geoquímica.

Determinar la granulometría de los sedimentos.

Recuperar otros núcleos en la zona de estudio para descifrar con certeza el evento abrupto que ocasionó el cambio de las condiciones de la paleolaguna.

10. Referencias bibliográficas

- [1] Richard, D.J. y Fitzgerald, D.M. (2004). *Beaches and Coasts*. Wiley-Blackwell.
- [2] Goudie, A.S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge Taylor & Francis Group.
- [3] Fraume, N.J. (2007). *Diccionario Ambiental*. ECOE Ediciones.
- [4] Schwartz, M.L. (2005). *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer.
- [5] McCubbin D. G. (1982). *Sandstone Depositional Environments. Barrier-Island and Strand Plain Facies*. The American Asociation of Petroleum Geologist. USA.
- [6] Kjerfve, B. (1994). *Coastal lagoon processes*. Elsevier.
- [7] Méndez-Baamonde, J. (2006). *Petrología*. Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela, PDVSA. Venezuela.
- [8] Cressa, C., Vásquez, E., Zoppi, E., Rincón, J.E. y López, C. (1993). Aspectos generales de la limnología en Venezuela, *Interciencia* 18(5): 237-248.
- [9] Proyecto Aquila II. (1994). *Manejo y Aprovechamiento Acuícola de Lagunas Costeras en América Latina y el Caribe*. Programa Cooperativo Gubernamental. Documento de Campo, N° 10. México.
- [10] Hackey, P.C., Urbani, P., Karlsen, A.W., Garrity, C.P. (2006). *Mapa Geológico de Venezuela a Escala 1:750.000*. U.S. Geological Survey Open File Report.
- [11] Monsalve, J.G., Roa Morales, P. (1994). Palinología y paleoambiente de la planicie y laguna costera de Tacarigua, Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela, Univ, Oriente* 33 (1&2): 77-86.
- [12] Chacartegui, F., Delgado, M., Cortiula, B. (1997). Laguna de Tacarigua: Complejo sedimentario Isla Barrera – Laguna Litoral progradante en una costa micromareal dominada por la energía de las olas. Estado Miranda, Venezuela. I Congreso Latinoamericano de Sedimentología. Porlamar, Isla de Margarita, Venezuela. *Memorias Tomo I*, 175-183.

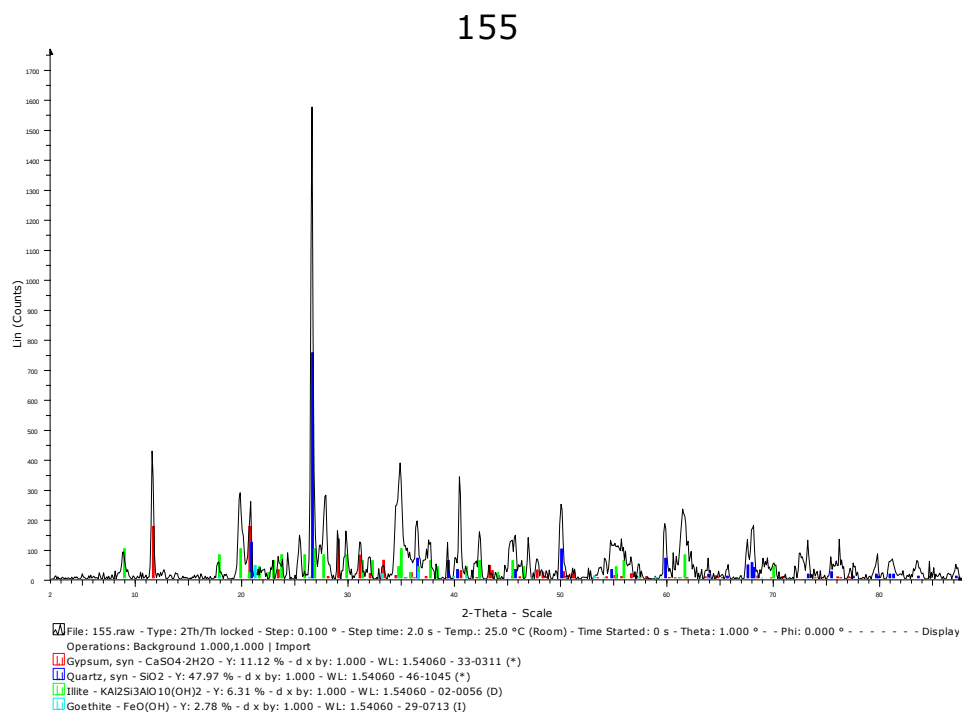
- [13] Roa Morales, P. (1990). La transgresión Flamenca y la Evolución de la Laguna de Unare, Venezuela. Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela. Univ. Oriente, 29 (1 & 2): 11-25.
- [14] Méndez, W., Cartaya, S. (2001). Ambientes depositacionales recientes y evolución geomorfológica del complejo sedimentario Isla Barrera – Laguna Litoral de la Salina de Sauca, Falcón Nororiental, Venezuela. Sociedad Venezolana de Geólogos, Boletín Vol. 26. Nº 1.
- [15] Méndez-Baamonde, J. (1997). El Cuaternario. UCV, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Republica de Venezuela, Ministerio de Energía y Minas. Volumen XVIII, Nº 31.
- [16] Rull, V. (1999). Paleoclimatology and Sea-Level History in Venezuela. Interciencia. Mar-Abr, Vol. 24, Nº 2.
- [17] Ginés, H. (1972). Carta Pesquera de Venezuela. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Monografía Nº 16. Caracas Venezuela.
- [18] Fundación la Salle de Ciencias Naturales. (2001). Evaluación Integral (2da fase) de la Problemática Ambiental del Área Higuerote, Carenero y Cabo Codera. Venezuela.
- [19] Agráz-Hernández, C., Noriega-Trejo, R., López-Portillo, J., Flores-Verdugo, F., Jiménez-Zacarías, J. (2006). Guía de Campo: Identificación de los manglares en México. Universidad Autónoma de Campeche. México.
- [20] Drude de Lacerda, L., Linneweber, V. (2002). Mangrove Ecosystems, function and management. Springer Berlin Heidelberg. Brazil.
- [21] Huetz de Lemps, A. (2005). La Vegetación de La Tierra. Madrid, España.
- [22] Espínola, E.J. y Ollarves, R.J. (2002). Estudio tectono-estratigráfico del borde septentrional de la Cuenca de Barlovento, Estado Miranda: Implicaciones Neotectónicas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado.

- [23] Grases, J., Altez, R. y Lugo, M. (1999). Catálogo de Sismos Sentidos o Destructores Venezuela 1530/1998. Editorial Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería-UCV.
- [24] Servicio Sismológico Nacional. Consulta vía web: www.funvisis.gob.ve
- [25] Singer, A., Rojas, C. y Lugo, M. (1983). Inventario Nacional de Riesgos Geológicos. FUNVISIS, Serie Técnica 03 – 83. FUNVISIS.
- [26] Mapa Neotectónico de Venezuela. (1993). Departamento de Ciencias de la Tierra. FUNVISIS.
- [27] Mason, B., Moore, C.B. (1982). Principles of Geochemistry. John Wiley & Sons. USA.
- [28] Brownlow, A.H. (1996). Geochemistry. Prentice Hall. USA.
- [29] Brokins, D.G. (1988). Eh-pH Diagrams for geochemistry. Springer-Verlag. USA.
- [30] Martínez, M., (2007). Guías del curso de quimioestratigrafía. Postgrado de Geoquímica, Facultad de Ciencias UCV.
- [31] Casalins, A., (2009). Estudio geoquímico de la señal paleoclimática Holocena en sedimentos lacustres del paleolago Los Zerpa, Estado Mérida. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, Trabajo Especial de Grado.
- [32] González, G., (2009). Analisis geoquímico de sismoturbiditas holocenas en sedimentos lacustres del paleolago Los Zerpa, Estado Merida. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, Trabajo Especial de Grado.
- [33] Skoog. D.A., Holler F. J, Nieman, T.A. (2001). Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Mc Graw Hill. España.
- [34] Skoog D.A., West, D.M, Holler F.J, Crouch S.R. (2005). Fundamentos de Química Analítica. Octava Edición. International Thomson Editores. México.
- [35] Liberatore, P.A. (1993). Determination of majors in geological samples by ICP AES. ICP-AES, Instruments at work, Varian. ICP-12.

- [36] Liberatore, P.A. (1994). Determination of trace elements in geological samples by ICP-AES. ICP-AES, Instruments at work, Varian. ICP-16.
- [37] Leeder, M.R. (1999). Sedimentology and Sedimentary Basins: From Turbulence to Tectonics. Blackwell Publishing.
- [38] Willett, S.D. (2006). Tectonics, climate, and landscape evolution. Geological Society of America.
- [39] Tricart, J., Govea de Carpio, D. (1974). Muestrario Geomorfológico de Venezuela. Instituto Pedagógico de Venezuela.
- [40] Ramsey, B., (2005). OxCal v3.10.
- [41] Carrillo, E., (2006). L'enregistrement sédimentaire de la sismicité récente le long de la frontière sud-occidentale de la Plaque Caraïbe (Faille de Boconó). Tesis de Doctoral. Université de Savoie. France.
- [42] Escorcía, C. (2009). Preparación y caracterización preliminar de una muestra compuesta representativa de una cuenca de margen activo (Cuenca de Falcón, Venezuela). Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, Trabajo Especial de Grado.
- [43] Castillo, L., (2009). Estudio de la homogeneidad química de las variables Si, Ca, Fe, K, Ti, Ba, Ce, Pb, Ni, Sc, Sn, Sr, Sb, La, Y y Mo, en la Muestra Compuesta de Arcillitas De Falcón (MCAF), candidata a material de referencia. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, Trabajo Especial de Grado.
- [44] Gámez, C., (2009). Evaluación de la homogeneidad química de algunos elementos mayoritarios, minoritarios y traza, en la Muestra Compuesta de Arcillitas de Falcón MCAF, propuesta como material de referencia. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, Trabajo Especial de Grado.

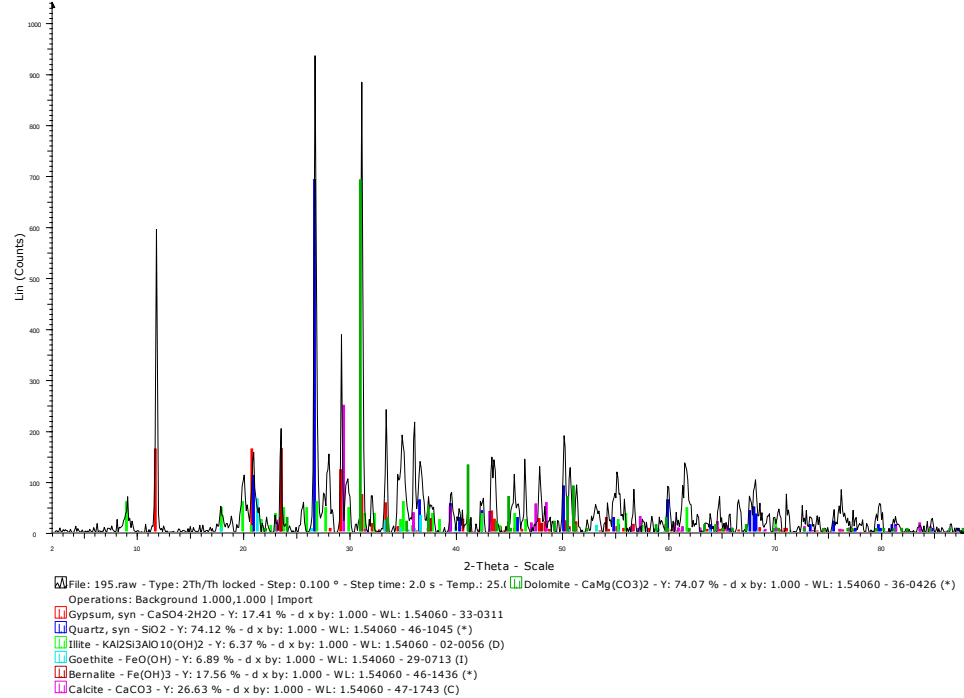
11. Apéndices

Apéndice 1 Difractogramas del Núcleo HSR-1.

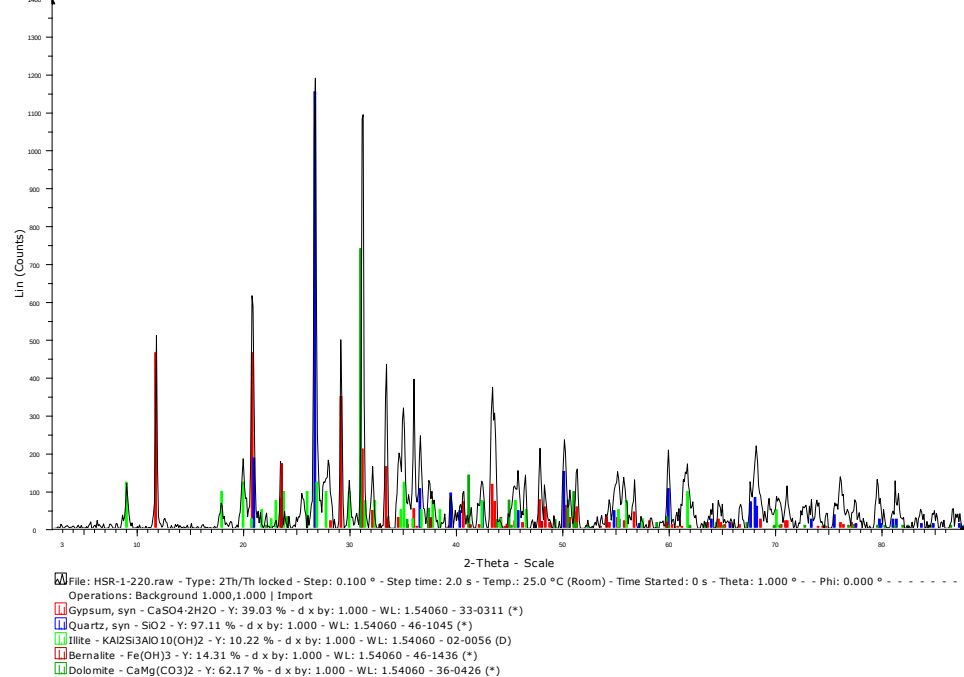


Apéndice 1 Difractogramas del Núcleo HSR-1. (Continuación)

195

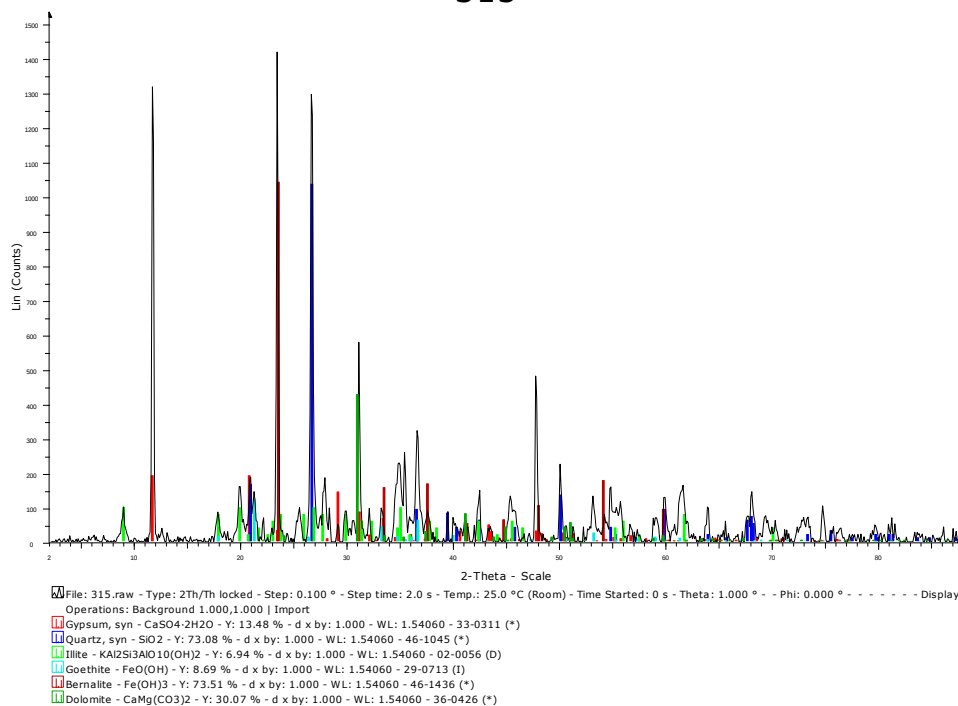


220

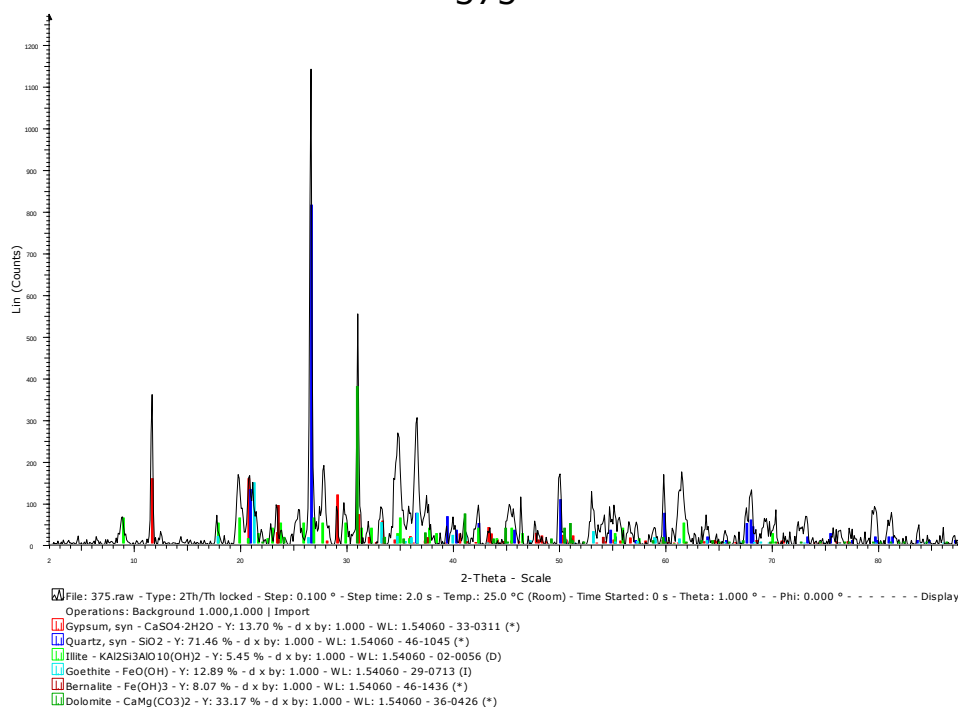


Apéndice 1 Difractogramas del Núcleo HSR-1. (Continuación)

315

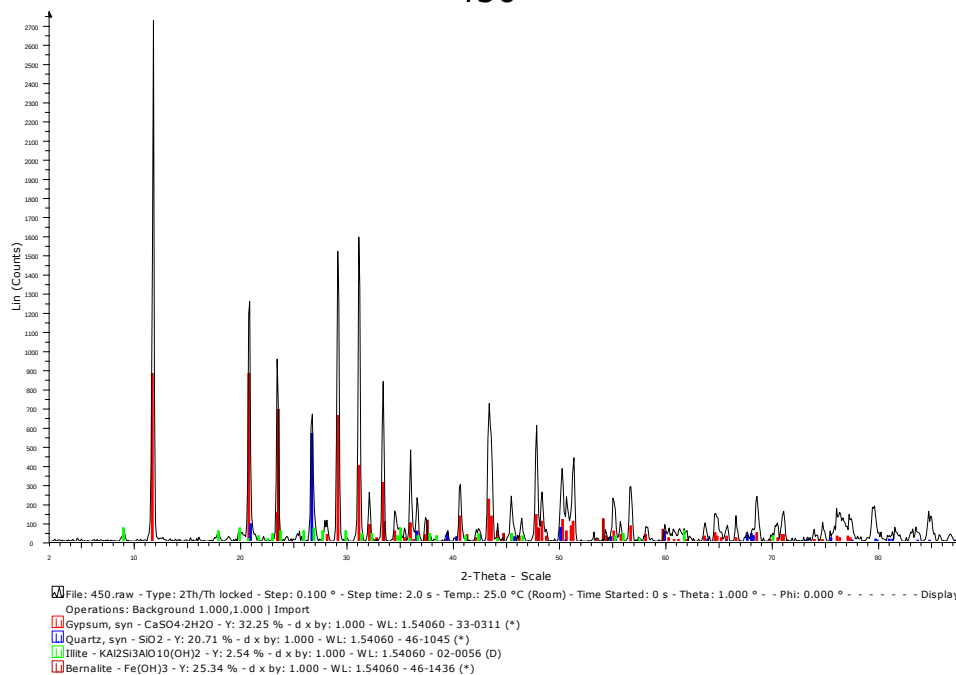


375

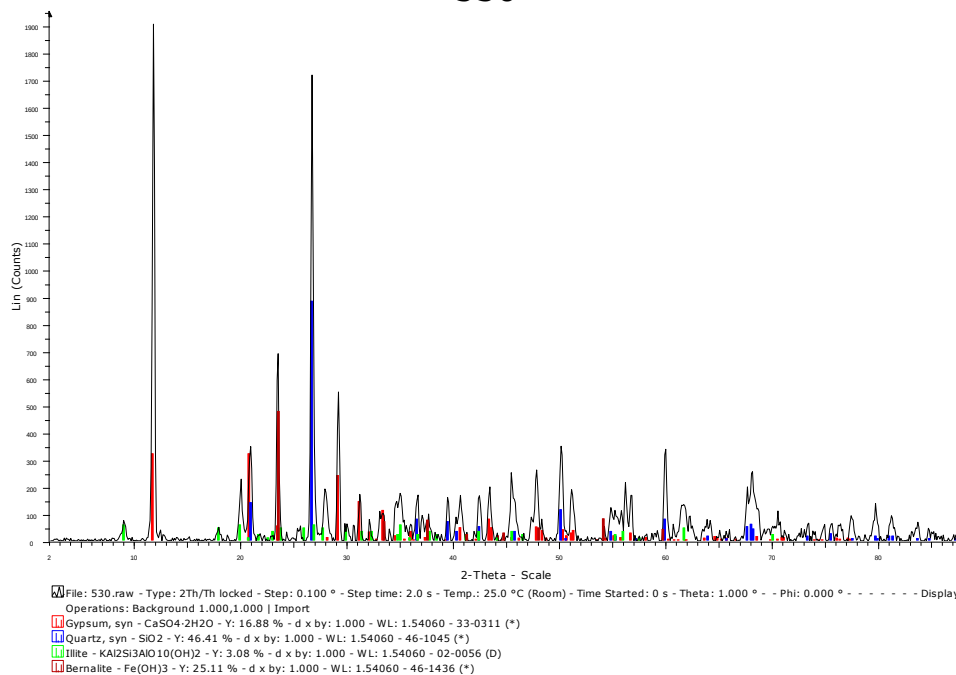


Apéndice 2 Difractogramas del Núcleo HSR-1. (Continuación)

450



530



Apéndice 3 Datos de la relación porcentual mineralógica.

155	Área	%	315	Área	%	530	Área	%
Gypsum, syn	53,016	20,2815	Gypsum, syn	145,086	26,6238	Gypsum, syn	245,348	41,8875
Quartz, syn	191,088	73,1015	Quartz, syn	176,3	32,3517	Quartz, syn	235,762	40,2509
Illite	15,233	5,8274	Illite	7,73	1,4185	Illite	12,2	2,0829
Goethite	2,064	0,7896	Goethite	21,755	3,9921	Bernalite	92,421	15,7787
Total	261,401	100	Bernalite	133,947	24,5797	Total	585,731	100
			Dolomite	60,131	11,0342			
			Total	544,949	100			
195	Área	%	375	Área	%			
Gypsum, syn	57,975	16,2660	Gypsum, syn	38,026	13,3432			
Quartz, syn	126,593	35,5181	Quartz, syn	151,378	53,1181			
Illite	6,663	1,8694	Illite	11,341	3,9795			
Goethite	8,711	2,4440	Goethite	16,015	5,6196			
Bernalite	18,979	5,3249	Bernalite	10,4	3,6493			
Calcite	31,666	8,8845	Dolomite	57,824	20,2903			
Dolomite	105,831	29,6929	Total	284,984	100			
Total	356,418	100						
220	Área	%	450	Área	%			
Gypsum, syn	48,605	11,8362	Gypsum, syn	280,692	58,5285			
Quartz, syn	181,021	44,0818	Quartz, syn	100,878	21,0346			
Illite	13,956	3,3985	Illite	6	1,2511			
Bernalite	17,466	4,2533	Bernalite	92,012	19,1859			
Dolomite	149,6	36,4302	Total	479,582	100			
Total	410,648	100						

Apéndice 4 Variables analizadas del Núcleo HSR-1.

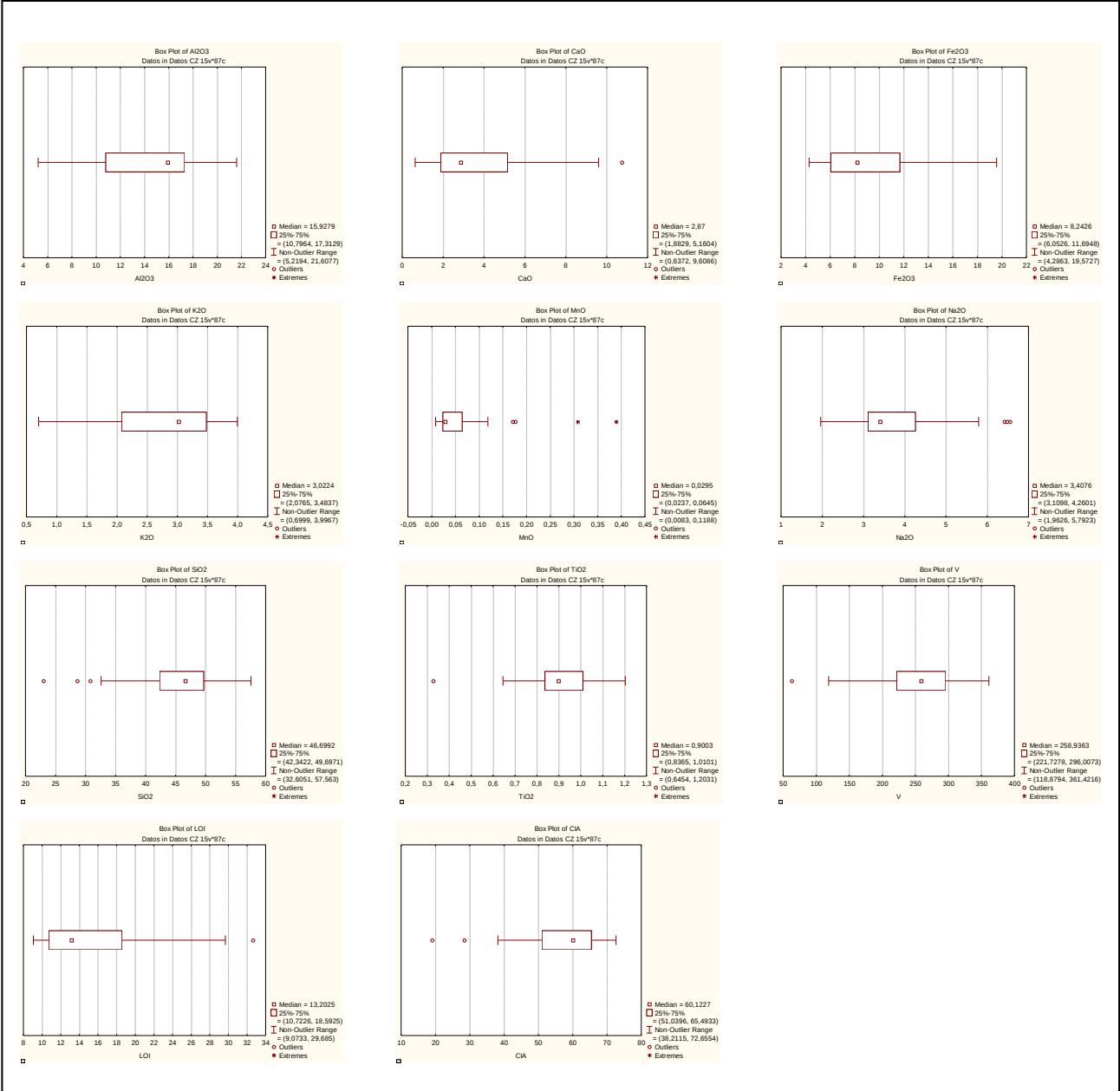
Muestra HSR-1-	%Al ₂ O ₃ ± 1	%CaO ± 0,2	%Fe ₂ O ₃ ± 0,2	%K ₂ O ± 0,1	%MnO ± 0,009	%Na ₂ O ± 0,4	%SiO ₂ ± 1	%TiO ₂ ± 0,05	ppm V ± 94	% CIA ± 4	% LOI ± 3	% Humedad ± 0,4	% Total ± 10	CaCO ₃ Si+ No=
150	14	2,5	6,3	3,4	0,016	3,4	46	1,00	336	60	15	4,4	96	-
155	18	1,6	6,8	3,8	0,013	3,5	51	1,10	319	67	15	5,5	107	-
160	17	1,1	7,3	3,9	0,009	3,5	52	1,17	340	67	14	4,5	104	-
165	17	0,9	7,5	3,9	0,008	3,2	51	1,18	356	67	13	5,3	102	-
170	17	1,1	8,1	3,9	0,008	2,8	52	1,15	295	69	13	5,2	104	-
175	18	1,4	9,2	3,8	0,014	3,7	53	1,11	263	67	12	4,8	107	-
180	17	2,8	9,6	3,4	0,025	2,8	49	1,01	327	65	13	4,6	103	-
185	17	4,7	10,8	3,0	0,041	2,8	48	0,89	216	62	13	6,1	106	+
190	15	7,2	10,8	2,7	0,061	2,9	44	0,79	183	54	14	5,2	102	+
195	17	7,2	9,2	2,8	0,047	3,1	47	0,83	174	57	13	4,9	105	+
200	18	6,8	8,8	2,9	0,045	2,9	47	0,88	171	58	13	4,5	105	+
205	17	7,2	8,1	2,9	0,042	3,1	47	0,89	196	57	13	5,8	105	-
210	16	7,1	7,6	2,9	0,033	2,8	46	0,86	228	56	13	4,8	102	-
215	16	6,9	7,4	2,9	0,028	3,0	47	0,85	205	56	14	5,4	103	-
220	17	7,8	6,6	2,8	0,030	2,9	47	0,85	224	56	14	4,2	103	-
225	16	7,8	5,9	2,9	0,026	3,1	48	0,87	193	54	14	4,7	101	-
230	16	7,6	6,4	2,8	0,028	3,2	46	0,84	139	54	14	5,2	102	-
235	16	6,5	6,7	3,0	0,035	3,0	47	0,93	210	57	12	5,8	102	-
240	16	7,8	6,1	2,8	0,028	3,5	47	0,87	149	54	13	4,4	102	-
245	18	5,8	5,9	3,1	0,021	3,2	50	0,96	215	60	12	5,8	105	-
250	18	5,3	5,9	3,2	0,024	3,2	51	0,98	177	60	11	7,0	105	-
255	19	4,5	6,0	3,3	0,023	3,2	53	1,02	189	63	12	6,6	106	-
260	20	3,8	6,5	3,4	0,020	3,4	52	1,05	237	65	11	6,4	107	-
265	21	2,8	8,4	3,7	0,028	3,5	57	1,08	305	68	10	5,2	113	-
270	17	3,4	8,4	3,5	0,024	3,2	51	1,01	309	63	11	6,3	104	-
275	20	2,4	9,7	3,8	0,026	3,2	54	1,01	280	69	10	5,9	110	-
280	17	2,7	8,9	3,5	0,031	3,4	52	1,05	313	64	10	6,7	108	-
285	18	2,9	6,8	3,8	0,019	3,0	53	1,11	236	65	11	6,8	105	-
290	18	2,6	7,1	3,6	0,027	3,0	51	1,08	240	66	10	7,0	104	-
295	17	1,9	10,7	3,7	0,044	3,3	52	1,05	262	66	10	4,8	104	-
300	22	2,4	11,7	3,7	0,056	2,8	58	1,01	267	71	10	4,0	115	-
305	17	1,7	16,9	3,3	0,071	3,0	49	0,88	220	67	10	4,8	106	-
310	15	1,5	19,6	3,1	0,094	3,1	46	0,79	296	66	10	4,7	104	-
315	17	2,7	17,7	3,1	0,104	3,3	48	0,82	303	65	10	3,9	107	-
320	16	3,0	16,2	3,2	0,091	3,4	46	0,83	256	62	11	5,1	104	-
325	18	3,0	13,3	3,5	0,083	3,1	50	0,94	234	65	10	5,5	107	-
330	18	2,4	14,1	3,5	0,100	3,1	50	0,94	219	67	10	5,4	106	-
335	18	3,1	12,8	3,5	0,088	3,2	49	0,96	267	64	12	6,9	109	-
340	17	2,0	14,0	3,6	0,118	3,5	49	0,95	259	65	10	5,8	106	-
345	18	1,0	14,1	3,9	0,099	3,6	51	1,03	283	67	9	6,9	109	-
350	19	0,8	12,2	4,0	0,085	3,5	52	1,07	292	69	9	7,7	109	-
355	18	0,6	15,7	3,8	0,092	3,1	52	1,01	381	70	9	6,5	110	-
360	16	0,6	18,8	3,5	0,119	3,3	47	0,91	306	68	10	7,1	107	-
365	17	1,0	14,8	3,8	0,095	3,4	50	1,01	334	67	10	7,1	108	-
370	18	1,7	16,6	3,4	0,177	3,3	47	0,90	248	65	10	5,9	106	-
375	18	2,1	14,6	3,4	0,156	3,5	49	0,91	228	67	11	6,7	110	+
380	16	3,5	12,6	3,3	0,390	2,6	47	0,91	186	63	12	4,9	104	+
385	16	2,2	13,6	3,3	0,309	3,5	48	0,92	313	64	11	7,2	106	-
390	15	1,1	13,6	3,5	0,172	3,1	48	0,97	276	66	11	13,2	109	-
395	15	5,8	9,5	3,0	0,091	3,0	44	0,85	234	56	13	5,4	99	-
400	15	3,8	10,0	3,5	0,105	3,8	45	0,97	283	56	12	5,0	99	-
405	14	1,7	10,8	3,5	0,062	3,5	44	0,96	265	61	10	9,9	99	-
410	16	1,6	13,2	3,5	0,083	3,6	45	0,94	262	64	15	9,7	109	-
415	14	1,7	14,6	3,4	0,068	3,3	43	0,91	346	62	11	9,0	100	-
420	17	1,4	15,7	3,2	0,066	2,0	46	0,89	303	73	11	11,9	109	-
425	14	7,2	5,2	2,4	0,022	3,1	43	0,90	198	52	14	7,2	97	-
430	14	9,0	5,7	2,1	0,018	3,2	40	0,77	119	49	17	10,0	102	-
435	14	5,8	11,0	2,5	0,027	3,6	42	0,82	281	55	17	11,5	108	-
440	10	8,6	10,1	1,7	0,037	3,8	36	0,76	255	42	15	5,4	91	-
445	11	9,6	8,8	1,9	0,040	3,2	36	0,75	302	43	16	7,5	95	-
450	5	17,5	4,4	0,7	0,047	3,9	23	0,33	63	19	19	4,0	78	-
455	7	10,8	5,1	1,3	0,024	4,5	29	0,65	157	29	17	8,3	82	-
460	14	1,9	7,3	2,5	0,022	4,4	48	1,20	302	61	13	7,5	100	-
465	12	2,8	4,9	2,1	0,019	2,9	42	1,05	291	60	15	7,8	90	-
470	12	2,8	4,9	2,1	0,017	4,6	42	1,03	250	56	15	8,6	93	-
475	11	3,8	5,4	1,9	0,019	3,6	39	0,91	265	55	17	9,6	93	-
480	10	3,2	5,4	1,8	0,024	4,2	38	0,89	264	52	20	11,8	95	-
485	7	5,2	8,2	1,2	0,028	4,4	31	0,86	251	38	27	11,7	96	-
490	8	3,5	8,5	1,4	0,024	4,1	33	0,72	244	48	24	11,2	95	-
495	7	2,2	10,6	1,4	0,030	4,7	33	0,87	281	45	25	11,6	95	-
500	6	1,4	9,4	1,9	0,028	4,3	36	0,84	307	51	23	14,9	99	-
505	9	1,2	8,2	2,0	0,030	4,5	36	0,88	309	53	23	13,8	98	-
510	9	2,2	8,6	1,9	0,033	4,8	39	0,86	339	50	25	11,5	103	-
515	10	3,0	6,8	1,8	0,032	4,7	41	0,84	331	51	27	9,6	105	-
520	9	3,2	6,4	1,7	0,022	4,8	41	0,79	274	48	33	14,7	114	-
525	11	4,3	5,5	1,8	0,027	4,7	41	0,83	253	50	28	18,6	118	-
530	11	5,2	4,7	1,9	0,025	5,1	42	0,83	196	47	30	25,1	125	-
535	11	3,5	5,5	2,1	0,027	5,5	43	0,87	222	49	24	24,0	119	-
540	11	2,7	5,6	2,4	0,033	5,5	44	0,95	253	50	29	24,0	124	-
545	11	3,1	5,0	2,3	0,022	5,2	44	0,95	286	52	24	8,0	104	-
550	10	3,3	5,9	2,4	0,032	5,8	41	0,88	263	47	22	9,8	102	-
555	11	3,5	5,5	2,4	0,019	5,6	44	0,87	288	49	22	7,5	103	-
560	10	3,0	6,1	1,9	0,028	5,8	43	0,79	249	49	26	8,7	105	-
565	10	2,7	6,9	2,1	0,026	5,5	42	0,84	290	48	27	8,9	106	-
570	9	2,7	4,7	2,0	0,029	6,4	42	0,74	231	44	25	9,4	102	-
575	7	1,9	7,5	1,8	0,024	6,6	41	0,74	231	42	26	9,9	103	-
580	10	2,8	6,3	2,2	0,028	6,5	47	0,77	225	47	27	8,7	109	-

Apéndice 5 Tratamiento estadístico.

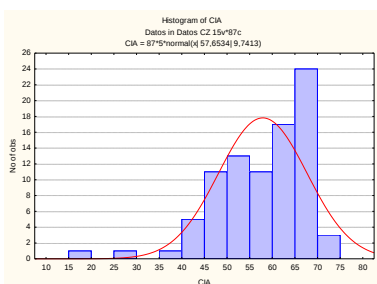
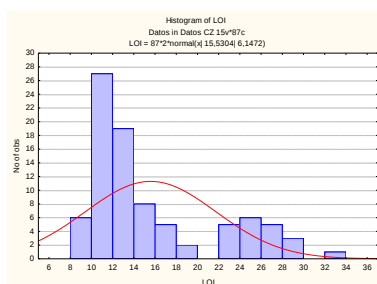
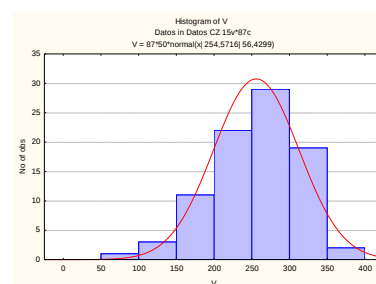
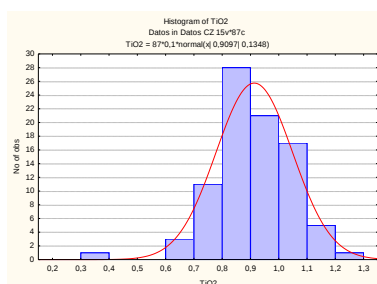
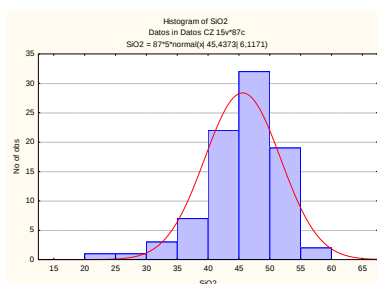
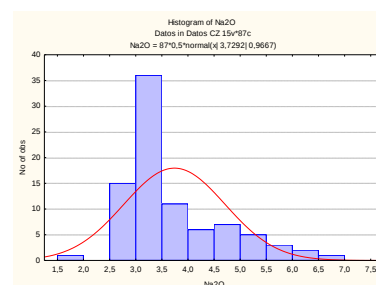
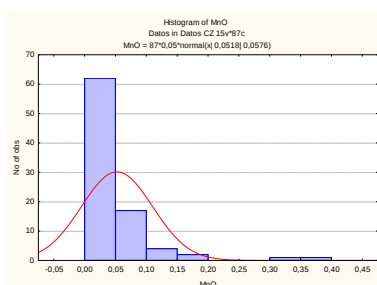
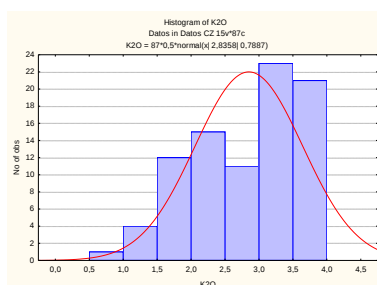
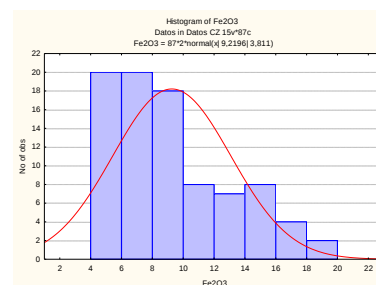
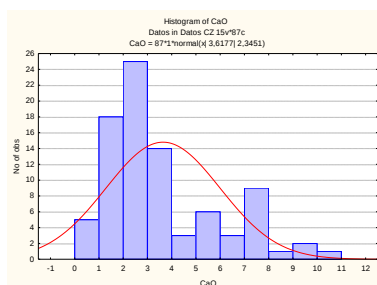
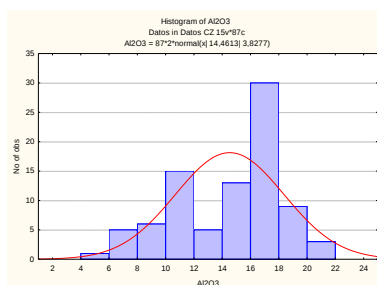
Muestra HSR-1-	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% CaO	% Fe ₂ O ₃	% K ₂ O	% MnO	% TiO ₂	ppm V	% Na ₂ O	% CIA	% LOI	% Humedad
440	32,043	10,244	8,441	10,136	1,686	0,032	0,722	151,147	3,3	43,3403	11,48	3,63
440	30,971	10,28	8,596	10,279	1,758	0,037	0,763	193,963	3,0	43,430319	12,45	3,58
440	31,434	11,27	8,59	10,284	1,75	0,03	0,742	226,45	3,0	45,847487	10,35	3,88
Promedio	31,4827	10,5980	8,5423	10,2330	1,7313	0,0330	0,7423	190,520	3,0909	44,2060	11,4267	3,6967
Mediana	31,434	10,28	8,59	10,279	1,75	0,032	0,742	193,963	3,0361	43,430319	11,48	3,63
Desviación Estándar	0,538	0,582	0,088	0,084	0,039	0,004	0,021	37,769	0,154	1,422	1,051	0,161
Máximo	32,043	11,27	8,596	10,284	1,758	0,037	0,763	226,45	3,2652	45,847487	12,45	3,88
Mínimo	30,971	10,244	8,441	10,136	1,686	0,03	0,722	151,147	2,9715	43,3403	10,35	3,58
Coefficiente de Variación	1,71	5,49	1,03	0,82	2,28	10,93	2,76	19,82	4,99	3,22	9,20	4,35
Límite de Confianza 95%	1,3347843	1,4454909	0,2179939	0,2086423	0,0979712	0,0089512	0,0508985	93,766498	0,3831583	3,5308893	2,6092573	0,399023113

	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% CaO	% Fe ₂ O ₃	% K ₂ O	% MnO	% TiO ₂	ppm V	% Na ₂ O	% CIA	% LOI	% Humedad
Promedio	31	11	8,5	10,2	1,7	0,033	0,74	191	3,1	44	11	3,7
± LC (95%)	1	1	0,2	0,2	0,1	0,009	0,05	94	0,4	4	3	0,4

Apéndice 7 Cajas gráficas de las variables



Apéndice 8 Histogramas de las variables.



Apéndice 9 Resultados de la Prueba de Normalidad.

D exp.	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	V	CIA	LOI	Humedad
	0.1632	0.2101	0.1253	0.1237	0.2922	0.2141	0.0983	0.076	0.0645	0.1132	0.2048	0.1746

D crítico para N = 87 Según el % de Confianza

% Confianz	D Crítico
99%	0,1748
98%	0,163
95%	0,1458
90%	0,1308
85%	0,1222
80%	0,1147