

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO-SEDIMENTOLÓGICO DE LAS ARENISCAS ALMACENADORAS DE HIDROCARBUROS DEL POZO LANKAHUASA-1

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A:
ELI MOISÉS HERNÁNDEZ DIAZGIRÓN

DIRECTOR: ING. BERNARDO MARTELL ANDRADE



CIUDAD UNIVERSITARIA,

2005

m. 340640



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

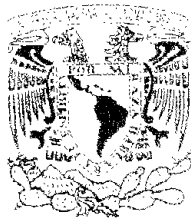


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a depositar en formato electrónico e imprimir el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Eli Moisés Hernández Díazgirón

FECHA: 21 de Enero de 2005

FIRMA: [Firma manuscrita]

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-021

SR. ELI MOISÉS HERNÁNDEZ DIAZGIRÓN
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Bernardo Martell Andrade y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO-SEDIMENTOLÓGICO DE LAS ARENISCAS
ALMACENADORAS DE HIDROCARBUROS DEL POZO LANKAHUASA-1**

- RESUMEN
- I INTRODUCCIÓN
- II GENERALIDADES DEL POZO
- III MARCO GEOLÓGICO
- IV PETROGRAFÍA
- V AMBIENTE SEDIMENTARIO
- VI PALEONTOLOGÍA
- VII INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS
- VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- ANEXOS
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., ~~21 de enero de 2005~~
EL DIRECTOR

[Firma manuscrita]
~~M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO~~
~~GFB*JAGC*gtg~~

A mis padres
Margarita y Moisés

A mi hermana y mi sobrino
Yuriria y Gabriel

A mis abuelos
Elena y Luis

A mis tíos y primos

A mis amigos

A mis profesores

A mi Universidad y Facultad

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Objetivo	2
I.2. Metodología	2
I.3. Antecedentes	3
II. GENERALIDADES DEL POZO	4
II.1. Localización	4
II.1.1. Rumbo y Distancia	4
II.1.2. Proyecto de Inversión, Municipio y Entidad Federativa	4
II.1.3. Coordenadas	4
II.2. Cotas	4
II.2.1. Tirante de agua	4
II.2.2. Elevación de la Mesa Rotaria	4
II.3. Datos de Perforación y Terminación	5
II.3.1. Fecha de inicio de perforación	5
II.3.2. Fecha término de perforación	5
II.3.3. Fecha inicio de terminación	5
II.3.4. Fecha de terminación oficial	5
II.3.5. Profundidad programada	5
II.3.6. Profundidad total	5
II.4. 2.4. Historia de perforación	5
II.4.1. Tuberías de revestimiento	5
II.4.2. Densidad y tipo de lodo	5
II.5. Desviaciones	5
II.6. Manifestaciones	5
II.6.1. En núcleos	6
II.7. Registros geofísicos	6
II.8. Evaluación de Formaciones	7
II.9. Pruebas de producción	7
II.10. Resultado y clasificación	7
III. MARCO GEOLÓGICO	8
III.1. Geología Regional	8
III.2. Estratigrafía	10
III.2.1. Columna geológica	10
III.2.1.1. Propuesta	10
III.2.1.2. Real	10
III.2.1.3. Descripción	10
III.3. Geología Estructural	12
III.4. Sistema Petrolero	13
III.4.1. Roca Generadora	13
III.4.2. Roca Almacenadora	13

III.4.3. Trampa-Sello	13
III.4.4. Sincronía y Migración.....	14
IV. PETROGRAFÍA	15
IV.1. Marco teórico	15
IV.2. Descripciones	26
IV.2.1. Megascópicas	26
IV.2.1.1. Muestras de canal	26
IV.2.1.2. Núcleos.....	27
IV.2.2. Microscópicas	31
IV.2.2.1. Muestras de canal	31
IV.2.2.2. Núcleos.....	37
IV.2.3. Microscopio Electrónico de Barrido	40
IV.3. Resultados	46
V. AMBIENTE SEDIMENTARIO	50
V.1. Marco teórico.....	50
V.2. Descripciones.....	67
V.3. Resultados.....	69
VI. PALEONTOLOGÍA.....	71
VI.1. Marco teórico	71
VI.2. Descripciones	71
VI.3. Resultados	73
VII. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	74
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
ANEXOS	79
Lista de figuras	
Lista de tablas	
Lista de fotografías	
Columna geológica de la cuenca Tampico-Misantla	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

RESUMEN

Desde mediados del siglo pasado, se han intentado relacionar las características de las areniscas, con su ambiente de depósito y la naturaleza de la región de procedencia. Los datos geológicos, particularmente los del subsuelo están siempre sujetos a una limitada interpretación, la cual es crítica en las etapas iniciales de la exploración petrolera de un área dada.

El pozo Lankahuasa-1, seleccionado para el presente estudio, en lengua totonaca significa "hijo maravilloso". Este pozo es el descubridor de una nueva provincia gasífera en la plataforma continental del Golfo de México, localizada frente a las costas de Nautla, en el estado de Veracruz, cuya importancia radica en el potencial de reservas adicionales que ofrece al país.

En este trabajo se estableció la relación de la estratigrafía cortada por el pozo con el marco estratigráfico-sedimentológico de la región, al analizar las propiedades de dichas areniscas para definir la calidad de la roca almacén, como uno de los elementos del sistema petrolero y contar con modelos geológicos para conocer y evaluar los elementos de riesgo de futuras perforaciones en el área.

Para cumplir con los objetivos anteriores, se dedicaron tres capítulos principales, dentro de los cuales se analizan las propiedades de mayor importancia para la interpretación sedimentológica-estratigráfica de las areniscas. La *Petrografía* está dividida en estudios macroscópicos y microscópicos, y cada uno de estos incluye análisis hechos a esquirlas y núcleos de fondo y de pared. Los estudios revelan la existencia de litarenitas arcillosas de color gris verdoso a gris claro, de grano muy fino a fino, con buena clasificación, que van de subredondeados a redondeados, con una alta esfericidad, entremezcladas de forma compleja con unidades depositacionales típicamente delgadas de lutitas de color gris a gris verdoso oscuro.

El *Ambiente Sedimentario* es otro de los temas que forman parte de este estudio. La litología, textura, composición y estructuras sedimentarias son los elementos más importantes para interpretar el ambiente sedimentario. En cuanto a la madurez textural, se denota que las muestras caen dentro de los intervalos: maduro y supermaduro, lo que se interpreta como un retrabajo intenso debido principalmente a el régimen hidráulico persistente en la cuenca de depósito. Los fragmentos líticos en orden de importancia son: caliza, roca ígnea y pedernal, esto indica la presencia de dos fuentes principales para las rocas del Mioceno, esto es, una fuente de rocas carbonatadas y pedernal de la sección cretácica en la Cordillera Oriental de la Sierra Madre y una fuente de roca ígnea. Las condiciones sedimentarias son muy variadas y su clasificación no es fácil siendo el ambiente de sedimentación lo que representa una mayor complejidad. En este caso se puede concluir, que de acuerdo a los análisis realizados, el modelo sedimentario teórico, que más se aproxima a las condiciones vistas son las barras o bancos de arena.

Los núcleos y las esquirlas son los medios para el análisis y estudio del pozo. La *Paleontología* siempre ha jugado un papel importante en la identificación de los ambientes del subsuelo. Dado que varios tipos de microfósiles florecieron en diferentes marcos depositacionales, sus restos proporcionan indicaciones sumamente valiosas de los ambientes sedimentarios. Otro aspecto importante de los microfósiles es en la bioestratigrafía, como cronómetros del tiempo geológico. Y basándose en el análisis microfaunístico de las muestras de canal, las rocas del Mioceno Superior, cortadas por el pozo Lankahuasa-1, se depositaron en un ambiente nerítico medio.

I. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado, se ha intentado relacionar las características de las rocas sedimentarias, particularmente de las areniscas, con el ambiente de depósito y la naturaleza de la región de procedencia (por ejemplo Krynine, 1942). En las últimas décadas, se han modificado los conceptos geológicos, particularmente con el advenimiento de la tectónica de placas y se han propuesto una serie de criterios para relacionar la composición de las areniscas al contexto tectónico de las cuencas de depósito y de las áreas de aporte (por ejemplo Dickinson y Suczek, 1979). Es decir, a partir del tipo de partículas y con base en el análisis estadístico de numerosas cuencas actuales, varios autores han propuesto una relación directa entre el tipo de sedimento y el ambiente en que se deposita.

Es importante mencionar que el relieve y las condiciones climáticas que controlan al intemperismo y grado de transporte, además de los procesos post-sedimentarios (diagénesis), pueden originar diferentes texturas y alterar la composición de los sedimentos aunque su roca fuente sea la misma, por lo que es indispensable reconocer estos procesos para evitar interpretaciones inconsistentes. Lo anterior es posible identificando la mayor cantidad de propiedades de los sedimentos.

La composición de las rocas sedimentarias terrígenas depende principalmente de cuatro factores: la fuente o procedencia del sedimento, el transporte, el ambiente de depósito y la diagénesis. Por lo general, el análisis de las rocas sedimentarias tiene como objetivo el entender uno o varios de estos factores.

El desarrollo alcanzado en el estudio de sedimentos en la última década, junto con el trabajo sistemático de campo y el análisis integral de cuencas sedimentarias, ha aportado elementos más sólidos para entender la evolución tectónica de terrenos tectonoestratigráficos, además de establecer las relaciones entre masas continentales (fuente de aporte) y zonas de depósito (cuencas), separadas actualmente por varios cientos o miles de kilómetros y ha hecho posible proponer y modificar modelos paleogeográficos y paleotectónicos a escala continental (por ejemplo Gehrels y Dickinson, 1995).

Los datos geológicos, particularmente los del subsuelo están siempre sujetos a una limitada interpretación, la cual es crítica en las etapas iniciales de la exploración de un área dada. Sin embargo, en la medida que el área madura a través de la perforación continua y se acumulan más datos del subsuelo, disminuye la incertidumbre de interpretación de datos del subsuelo. Aún en áreas con gran abundancia de datos, se deben tener siempre en la mira posibles nuevas interpretaciones, incluso con los procedimientos tradicionales o los nuevos, siempre y cuando estén basados en principios aceptados, lo que puede conducir al descubrimiento de nuevas reservas en áreas que se pensaba no tuvieran remanentes de aceite y gas.

La esencia del análisis de facies, es la construcción de un modelo geológico que describa un ambiente sedimentario antiguo. Consecuente con la doctrina de Lyell de uniformidad “El presente es la llave del pasado”, se usan equivalentes modernos como análogos de ambientes más antiguos. Los principales ambiente sedimentarios son los océanos, los continentes y las áreas marginales entre ellos, pero cada uno incluye, a su vez, muchas áreas locales que tienen características distintivas y variadas, que en su mayor parte determinan la clase particular de sedimento que es depositado en cada uno de ellos. Las subdivisiones ambientales apropiadas pueden estar basadas en factores que son importantes para determinar la estructura, la textura o la composición de los sedimentos depositados.

El pozo Lankahuasa-1, seleccionado para el presente estudio, en lengua totonaca significa “hijo maravilloso”. Este pozo es el descubridor de una nueva provincia gasífera en la plataforma continental del Golfo de México, localizada frente a las costas de Nautla, en el estado de Veracruz, cuya importancia radica en el potencial de reservas adicionales que ofrece al país.

Después del auge exploratorio de hidrocarburos, desarrollado en la “Faja de Oro Marina” en la década de los 60’s del siglo pasado, cuyos objetivos eran las rocas almacenadoras de la caliza El Abra, del Cretácico Inferior, no se había hecho un descubrimiento de tales magnitudes en la Región Norte; estimando que los yacimientos equivalen a poco más de una cuarta parte de las reservas probadas en México.

La perforación del pozo Lankahuasa-1, se realizó desde la plataforma “Mata Redonda”, en un tirante de agua de 63 m, y elevación de la mesa rotaria de 25 m, la perforación se inició el 23 de septiembre de 2001 y se terminó oficialmente el 22 de diciembre del mismo año. La profundidad programada fue 2875 m y la profundidad real perforada quedó en 3139 mbmr (metros bajo la mesa rotaria); cortando sedimentos cenozoicos del Neógeno en Plioceno Medio, Plioceno Inferior y Mioceno Superior. La clasificación del pozo fue: productor de gas seco.

El desarrollo del proyecto Lankahuasa tiene como objetivo explotar en corto y mediano plazo las reservas descubiertas por el pozo Lankahuasa-1, en los horizontes productores, y asegurar la continuidad en la producción a partir de la reclasificación e incorporación de las reservas derivadas por pozos delimitadores con altas expectativas de contener grandes volúmenes de hidrocarburos, por lo que se requiere la obtención de información para llevar a cabo la documentación de prospectos y generar una cartera robusta de oportunidades exploratorias con altas probabilidades de éxito económico.

A la fecha, en el proyecto se tienen registradas cuantiosas oportunidades exploratorias que requieren complementar su información con la finalidad de minimizar el riesgo.

I.1. Objetivo

Los objetivos de este trabajo son:

- Definir en el marco estratigráfico–sedimentológico a las unidades arenosas almacenadoras de hidrocarburos de la secuencia neógena cortada por el pozo Lankahuasa-1 frente a las costas del estado de Veracruz.
- Analizar las propiedades de las areniscas, como uno de los elementos del sistema petrolero.
- Contar con modelos geológicos para conocer y evaluar los elementos de riesgo petrolero para futuras perforaciones.

I.2. Metodología

La metodología que se siguió en la elaboración de la presente tesis incluye las siguientes tres etapas:

En la etapa preliminar se llevó a cabo la recopilación de material bibliográfico, principalmente, de estudios realizados por compañías relacionadas con el medio petrolero y de bibliografía referida a ambientes sedimentarios de plataforma.

Posteriormente se realizó el análisis minucioso de la información, que estuviera completa y de comprensión simple; apoyada en diagramas, dibujos y tablas. En esta etapa, debido a que los diferentes temas desarrollados cuentan con una vasta información, se sintetizó a manera de que no fueran omitidos los elementos más importantes.

En la etapa final, se llevó a cabo la interpretación de las propiedades geológicas y geofísicas de las areniscas y se definió el posible modelo geológico al que pertenecen las unidades productoras de hidrocarburos.

I.3. Antecedentes

La exploración de hidrocarburos en la plataforma continental frente a las costas de Tuxpan y Tecolutla, en el estado de Veracruz, se inició en los años 60's del siglo pasado, cuando fue explorada y desarrollada la muy conocida "Faja de Oro Marina", entre los años 1963 y 1975. Esta exploración tuvo como base el modelo sedimentario que se tenía en la porción terrestre de los campos de la Faja de Oro y la caliza Tamabra, donde se descubrió el campo Poza Rica. En ambos casos los objetivos exploratorios se concretaban exclusivamente en las rocas almacenadoras de la caliza El Abra de edad Cretácico Inferior y a las facies de talud de la caliza Tamabra, productoras de aceite ligero entre 33 y 45° API.

La producción comercial descubierta en la "Faja de Oro Marina" animó a continuar la exploración en el área, perforándose un total de 44 pozos exploratorios con los que se descubrieron 16 campos que fueron desarrollados con 144 pozos; de éstos, el primer campo establecido mar adentro fue el campo Isla de Lobos en 1963 y posteriormente Arrecife Medio.

Posteriormente a este auge exploratorio marino, se tuvo un período sin hallazgos significativos, que aunados con las necesidades del país de incorporar reservas de gas y a los descubrimientos cenozoicos que se hicieron en la parte americana del Golfo de México, fue necesario replantear las estrategias, empezar a buscar nuevos horizontes y otras perspectivas, sobre todo en cuanto a los sedimentos del Cenozoico, que en el mar habían sido considerados de poco interés comercial. Desarrollándose así, diferentes proyectos en el área marina del activo siendo documentado entre otros el proyecto Lankahuasa. Este proyecto se ubicaba en un área considerada netamente exploratoria, y no se contaba con antecedentes de producción de hidrocarburos, sin embargo durante la perforación de pozos con objetivo Cretácico (Faja de Oro) se tuvieron manifestaciones y lecturas altas de gas provenientes de areniscas del Mioceno.

Como respuesta a la estrategia nacional de incrementar las reservas de gas, PEMEX Exploración y Producción diseñó el Plan Estratégico de Gas (PEG), en el cual el Activo de Exploración Misantla-Golfo de México recomendó el área del cubo sísmico marino Lankahuasa para perforar un pozo cuyo objetivo fue la obtención de información de carácter exploratoria que contribuyera al conocimiento geológico del área marina de esta región y la identificación de varios horizontes de edad Plioceno Inferior y Mioceno Superior con posibilidades de almacenar gas seco, de los cuales se probaron 5 y resultaron productores con diferentes gastos. Con la perforación de este pozo se pretendió incorporar 52 mmmpcg, a partir de una reserva media probable total de 328 mmmpcg.

Debido a que el pozo Lankahuasa-1 fue todo un reto exploratorio, se le asignaron un sinnúmero de estudios tanto petrográficos como paleontológicos, sísmicos, geoquímicos, geofísicos, etc., los cuales estuvieron a cargo de empresas familiarizadas con la exploración de hidrocarburos (CoreLab, MudLogging, entre otras). Además por su parte, Petróleos Mexicanos también efectuó análisis con la ayuda de su personal experto en la materia y muchos de estos trabajos fueron indispensables para el desarrollo y culminación de la presente tesis.

II. GENERALIDADES DEL POZO

II.1. Localización

El pozo Lankahuasa-1, se encuentra en la plataforma continental del Golfo de México, frente a las costas del estado de Veracruz, al sur de Tuxpan (Figura II.1); en la intersección de las líneas sísmicas Inline 1797 y Crossline 1165 del estudio sísmológico 3D Lankahuasa.

II.1.1. Rumbo y distancia

Se localiza a 100.3 kilómetros al S 67° E de la ciudad de Poza Rica, a 1.017 kilómetros al N 62° 17' 42.14'' W del pozo Lankahuasa DL-1 y a 17.15 kilómetros al N 24°07' E del pozo Vega de Alatorre-1.

II.1.2. Proyecto de Inversión, municipio y entidad federativa

Se ubica en el proyecto de inversión de incorporación de reservas Lankahuasa, perteneciente al municipio de Poza Rica, Veracruz.

II.1.3. Coordenadas

Las coordenadas del pozo Lankahuasa-1 se indican en la tabla II.1.

U.T.M.		GEOGRÁFICAS	
Plataforma	Objetivo	Plataforma	Objetivo
X = 753, 870 m	X = 753, 870 m	Latitud: N 20°10'06.91"	Latitud: N 20°10'06.91"
Y = 2'231,861 m	Y = 2'231,861 m	Longitud: W 96°34'15.83"	Longitud: W 96°34'15.83"

Tabla II.1. Coordenadas del pozo Lankahuasa-1

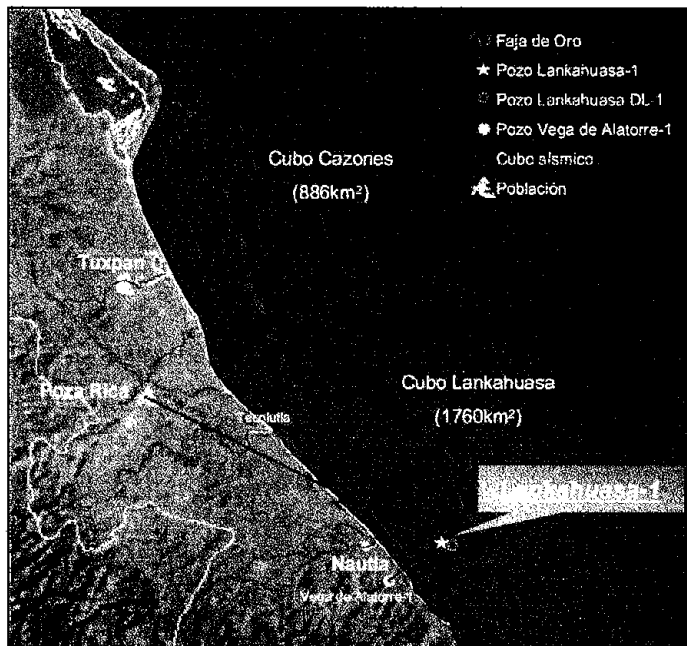


Figura II.1. Mapa de localización del pozo Lankahuasa-1

II.2. Cotas

II.2.1. Tirante de agua => 63 m

II.2.2. Elevación de la mesa rotaria => 25 m

II.3. Datos de perforación y terminación

II.3.1. Fecha inicio de perforación	23 de septiembre de 2001
II.3.2. Fecha término de perforación	22 de diciembre de 2001
II.3.3. Fecha inicio de terminación	23 de diciembre de 2001
II.3.4. Fecha de terminación oficial	26 de marzo de 2002
II.3.5. Profundidad programada	2875 mbmr (2850 mbnm)
II.3.6. Profundidad total	3139 mbmr (3114 mbnm)

II.4. Historia de perforación

II.4.1. Tuberías de revestimiento

La tabla II.2 muestra la medida de la tubería de revestimiento instalada y su profundidad.

Diámetro de la tubería	Tramo instalado
30"	152 m
20"	501 m
13 3/8"	1825.5 m
9 5/8"	1395 – 2802 m

Tabla II.2. Tuberías de revestimiento

II.4.2. Densidad y tipo de lodo

La tabla II.3 enlista los tipos de lodo usados en la perforación del pozo.

Tipo de lodo	Densidad	Profundidad
Salmuera Sódica	1.07-1.1 gr/cc	0 a 160 m
Bentonítico	1.07-1.32 gr/cc	160 a 1300 m
Polimérico	1.28 a 1.45 gr/cc	1300 a 3139 m

Tabla II.3. Tipos y densidades de lodo

II.5. Desviaciones

Se programó perforar verticalmente el pozo Lankahuasa-1 a la profundidad de 2875 mbmr, pero durante la tercera etapa, de 501 a 1825 m, se midió la desviación del pozo por medio del registro giroscópico multishot, el cual indicaba que a 750 m se había iniciado gradualmente la inclinación del pozo hasta los 1825 m, donde al ángulo de desviación había alcanzado los 18° a una distancia de 90 m respecto a la vertical. Posteriormente, se llevó a cabo la verticalización del pozo.

II.6. Manifestaciones

Durante la perforación del pozo Lankahuasa-1 se tuvieron manifestaciones de gas en seis intervalos dentro de la columna comprendida entre 1701 a 2667 mbmr, dos de ellos en Plioceno Inferior y el resto de edad Mioceno Superior. Se tuvieron lecturas máximas de gas-lodo de 90 a 245 unidades, con duración de entre 5 y 30 minutos, presentándose variaciones de lodo máximas de 0.19gr/cc (de 1.30 a 1.11gr/cc) y mínimas de 0.02gr/cc (de 1.29 a 1.27gr/cc).

Los intervalos que manifestaron presencia de gas durante la perforación, se enlistan en la tabla II.4.

Intervalo (m)	Gas-Lodo (u)	Variación de lodo (gr/cc)	Duración (min)	Edad
1701-1705	206	1.30 a 1.11	10	Plioceno Inferior
1939-1943	133	1.45 a 1.42	30	Plioceno Inferior
2430-2438	245	1.28 a 1.21	20	Mioceno Superior
2469-2478	117	1.29 a 1.27	5	Mioceno Superior
2579-2586	120	1.27 a 1.25	15	Mioceno Superior
2652-2667	90	1.29 a 1.23	5	Mioceno Superior

Tabla II.4. Manifestaciones de gas.

II.6.1. En núcleos

Durante el corte de los tres núcleos, las lecturas de gas-lodo se mantuvieron entre los intervalos normales, para el núcleo 1 se midieron 12 unidades, en el núcleo 2 se midieron 8 unidades y en el núcleo 3 se midieron 34 unidades; siendo este último en el que se tuvieron las lecturas más altas.

II.7. Registros geofísicos

Se tomaron los registros geofísicos (tabla II.5) que se consideraron necesarios para obtener la información óptima de las características litológicas.

Tipo de registro	Primera corrida (m)	Segunda corrida (m)	Tercera corrida (m)
Doble Inducción-Rayos Gamma-Potencial Espontáneo (DIL-RG-SP)	507.5-152.0		
Litodensidad-Neutrón compensado-Rayos Gamma (LDL-CNL-RG)	509.5-152	1837.5-501.5	2800.0-1825.0
Sónico Dipolar-Sónico de Porosidad-Rayos Gamma (DSI-BHC-RG)	500.0-152.0	1830.0-502.0	
Echados (FMI)		1835.0-505.0	
Check Shot Survey (CSAT)		1830.0-100.0	
Temperatura	465.0-90.0		
Giroscópico		1800.0-90.0	2740.0-1800.0
Arreglo Inductivo-Rayos Gamma (AIT-RG)		1832.5-501.5	3110.0-1825.0
Sónico Dipolar-Echados-Espectroscopía de Rayos Gamma (DSI-SHDT-NGT)			2802.0-1825.0
Sónico de Cementación (CL-VDL-RG)			2749.0-90.0
Perfil Sísmico Vertical (VSP)			2745.0-1590.0

Tabla II.5. Registros geofísicos tomados en el pozo Lankahuasa-1.

II.8. Evaluación de formaciones

Con el análisis de los registros geofísicos y sustentados con las manifestaciones de gas en los intervalos mostrados, se llevó a cabo la evaluación del pozo Lankahuasa-1 a nivel Terciario (Mioceno Superior), donde se recomendó probar 5 intervalos de interés petrolero (tabla II.6).

Intervalo (m)	Edad	Porosidad (%)	Saturación de agua (%)	Espesor (m)
2652.0-2664.0	Mioceno Superior	19	35	12
2573.0-2592.0	Mioceno Superior	18	30	19
2470.0-2480.0	Mioceno Superior	12	50	10
2428.0-2439.0	Mioceno Superior	15	30	11
2053.0-2063.0	Mioceno Superior	15	28	10
2017.0-2026.0				9

Tabla II.6. Intervalos de interés petrolero.

II.9. Pruebas de producción

Las 5 pruebas de producción se llevaron a cabo con aparos de prueba denominadas DST-TCP (Down Stream Test - Tubing Converting Perforing). El diseño de las mismas permitió registrar presiones y temperatura de fondo del intervalo evaluado (con pozo cerrado y pozo fluyendo), así como también, se obtuvo el potencial de flujo medio del intervalo evaluado, expresado en la tabla II.7.

Estrangulador (pulgadas)	PP1 2652-2664 m			PP2 2573-2592 m			PP3 2470-2480 m			PP4 2428-2439 m			PP5 2053-2063; 2017-2026 m			
	Presión superficie (kg/cm ²)	Gasto de gas (mmpcd)	K (md)	Presión superficie (kg/cm ²)	Gasto de gas (mmpcd)	K (md)	Presión superficie (kg/cm ²)	Gasto de gas (mmpcd)	K (md)	Presión superficie (kg/cm ²)	Gasto de gas (mmpcd)	K (md)	Presión superficie (kg/cm ²)	Gasto de gas (mmpcd)	K (md)	
5/16"	196	5.45	5.6				54.56	1.84	13.7				33.8	80.29	2.75	15
1/4"				212.58	5.63	10							33.8			15
3/8"	173	7.69	5.6	195.27	10.05	10	39.88	1.92	13.7	193.17	9.81	33.8	69.73	3.28	15	
1/2"	120	10.69	5.6	175		10	22.13	1.99	13.7	165.26	16.12	33.8	38.04	3.39	15	
5/8"				148.42	21.27	10				140		33.8				15
3/4"	77	15.45	5.6	120.59	22.56	10				123.64	23.65	33.8	20.1	3.7	15	
1"										92.11	26.54	33.8				

Tabla II.7. Pruebas de producción.

II.10. Resultado y clasificación

Los resultados logrados durante y después de la perforación del pozo Lankahuasa-1 fueron principalmente: *la obtención de información de carácter exploratoria*, la cual contribuye al conocimiento geológico del área marina de esta región y *la identificación de varios horizontes productores gas seco*, siendo los intervalos de 2428-2439 m y 2573-2592 m los mejores.

El pozo Lankahuasa-1, se dio por terminado oficialmente el 26 de marzo de 2002, y se le clasificó como 02-02-02, lo que significa que es un pozo cuyo objetivo fue el sondeo estratigráfico y resultó productor de gas seco.

III. MARCO GEOLÓGICO

III.1. Geología Regional

La presencia de hidrocarburos en la región de Tampico-Misantla se explica al analizar la historia geológica desde antes de que se formaran las cuencas sedimentarias marinas mesozoicas; cuando la región, después de pertenecer al supercontinente Pangea (Permo-Triásico) participó en la fragmentación del mismo, en el Triásico-Jurásico. A fines del Cretácico y principios del Cenozoico, el evento denominado “Orogenia Laramide” originó el plegamiento y fallamiento inverso de toda la secuencia mesozoica del oriente de México, resultando la estructura de la Sierra Madre Oriental. Las rocas deformadas y expuestas fueron posteriormente erosionadas por agentes exógenos. La rápida acumulación de sedimentos en la parte oriental de las estructuras formadas provocó un hundimiento y sepultamiento acelerado. En general, para la planicie costera del Golfo de México en el área de la cuenca Tampico-Misantla, se ha presentado desde hace ± 10 M.a. (Mioceno Superior) un sistema extensional, con una orientación aproximadamente perpendicular a la actual línea de costa, produciendo un sistema de fallamiento lístrico con dirección NW-SE cuyo nivel de despegue regional se encuentra en el Eoceno y con éste, la formación de cuencas captadoras de material clástico. Este sistema distensivo (figuras III.1 y III.2) provoca a su vez, un régimen compresional en el denominado “Golfo de México Profundo” el cual se puede apreciar claramente por la deformación de las rocas terciarias en la provincia de las “Cordilleras Mexicanas”. Así mismo, desde el final del Oligoceno y durante el Mioceno y Plioceno se emplazó la estructura de la Faja Volcánica Transmexicana.

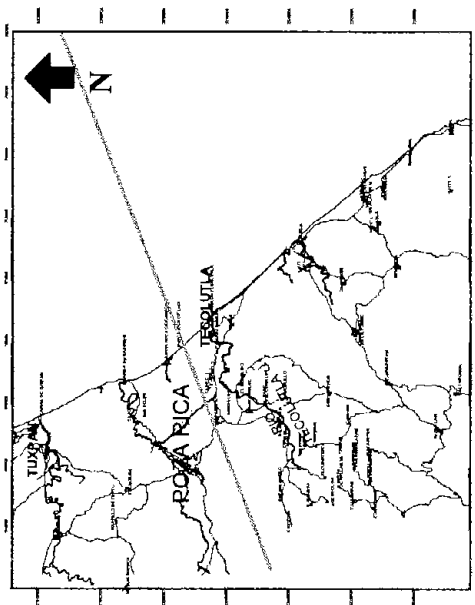
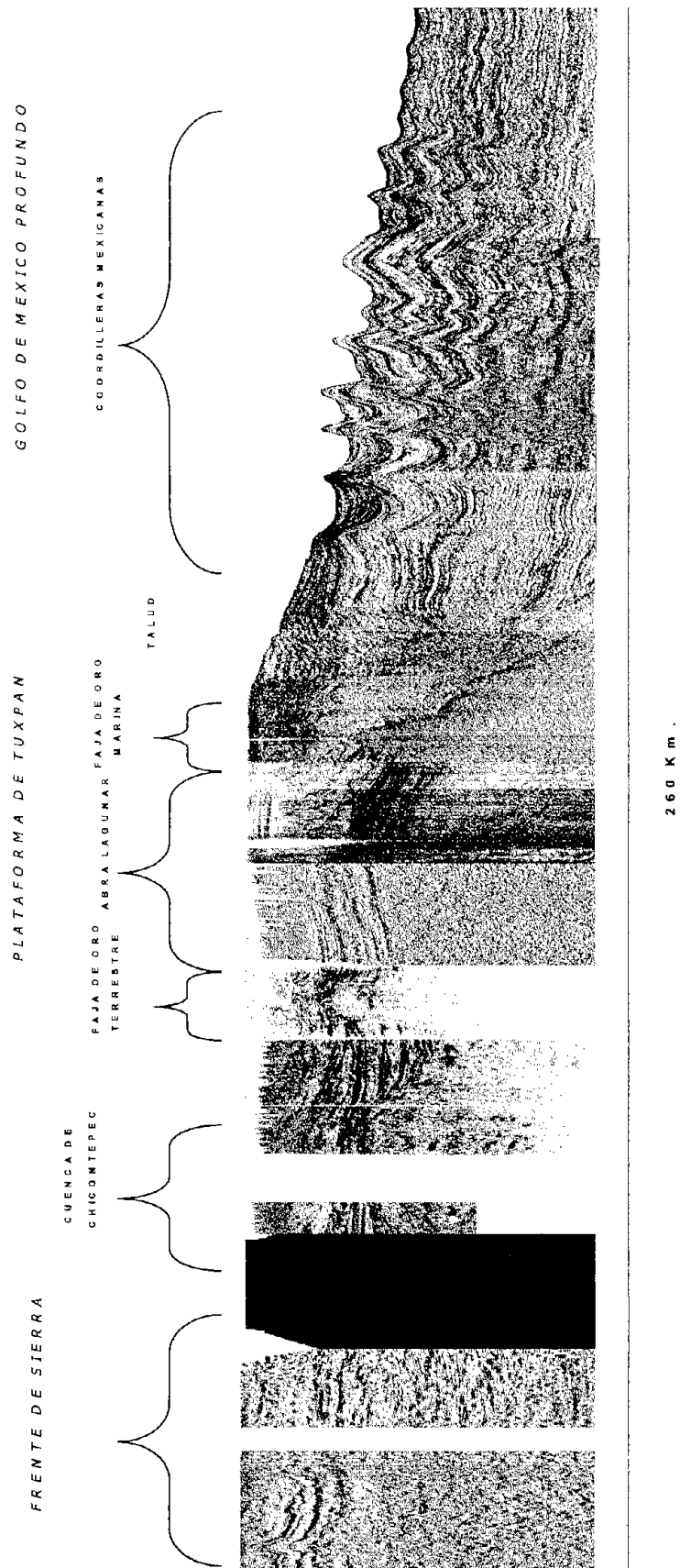


Figura III.1. (izquierda) Ubicación de la línea sísmica.
Figura III.2. (abajo) Línea sísmica de la costa oriental de México.



III.2. Estratigrafía:

La columna estratigráfica cortada durante la perforación del pozo Lankahuasa-1 está integrada por rocas sedimentarias que varían en edad del Mioceno Superior al Pleistoceno-Reciente.

III.2.1. Columna geológica

III.2.1.1. Propuesta

La columna geológica propuesta se muestra en la tabla III.1.

Formación	Profundidad		Espesor (m)
	mbmr	mbnm	
Lecho marino	88	63	287
Pleistoceno	375	350	370
Plioceno Superior	745	720	690
Plioceno Medio	1435	1410	165
Plioceno Inferior	1600	1575	95
Mioceno Superior	1695	1670	1180
Profundidad Propuesta	2875	2850	---

Tabla III.1. Columna geológica propuesta para el pozo Lankahuasa-1.

III.2.1.2. Real

La columna geológica real se muestra en la tabla III.2.

Formación	Profundidad		Espesor (m)
	mbmr	mbnm	
Lecho marino	88	63	---
Pleistoceno	---	---	---
Plioceno Superior	---	---	---
Plioceno Medio	500(?)	475(?)	900
Plioceno Inferior	1400	1375	570
Mioceno Superior	1970	1945	1169
Profundidad Total	3139	3114	---

Tabla III.2. Columna geológica real para el pozo Lankahuasa-1.

III.2.1.3. Descripción

Edad	Mioceno Superior
Cima	1970 mbmr, 1945 mbnm
Litología	Constituido principalmente areniscas de color gris claro, de grano muy fino (Q y frag. líticos), subredondeados, bien clasificados en una matriz arcillo-calcárea, intercaladas con lutitas arenosas de color gris y gris verdoso, ligeramente calcáreas.
Espesor	Este pozo penetró un espesor de 1169 m

Relaciones estratigráficas	El Mioceno Superior subyace en forma concordante al Plioceno Inferior, su contacto inferior se desconoce por no haberlo atravesado.
Sedimentología	Basándose en el análisis petrográfico, sedimentológico y microfaunístico de las muestras de canal, las rocas del Mioceno Superior cortadas en este pozo se depositaron en un ambiente nerítico medio-externo.
Edad	Plioceno Inferior
Cima	1400 mbmr, 1375 mbnm
Litología	Constituida principalmente por lutitas arenosas de color gris claro a gris verdoso, ligeramente calcáreas y areniscas arcillosas gris claro, de grano fino (Q) a medio, subredondeado, bien clasificado en matriz arcillo-calcárea.
Espesor	570 m
Relaciones estratigráficas	El Plioceno Inferior subyace en forma concordante al Plioceno Medio y su contacto inferior es concordante con el Mioceno Superior.
Sedimentología	Basándose en el análisis petrográfico, sedimentológico y microfaunístico de las muestras de canal, las rocas del Plioceno Inferior cortadas en este pozo, se depositaron en un ambiente nerítico externo.
Edad	Plioceno Medio
Cima	500 (?) mbmr
Litología	Constituida principalmente por lutitas arenosas de color gris claro a gris verdoso, ligeramente calcáreas, intercaladas con areniscas de color gris claro, de grano fino (Q), subredondeado, bien clasificado, poco consolidada, en una matriz arcillo-calcárea y en ocasiones con trazas de limolita gris claro a pardo rojizo y fragmentos de moluscos.
Espesor	900 m
Relaciones estratigráficas	El contacto superior del Plioceno Medio se desconoce porque el inicio de la recuperación de las muestras de canal fue a partir de los 500 m y su contacto inferior es concordante con el Plioceno Inferior.
Sedimentología	Basándose en el análisis petrográfico, sedimentológico y microfaunístico de las muestras de canal, las rocas del Plioceno Medio cortadas en este pozo se depositaron en un ambiente nerítico externo.

III.3. Geología Estructural

La localización del pozo Lankahuasa-1, ocupa el bloque central de una estructura Roll Over en dirección Noroeste-Sureste (figura III.3). Dicha estructura está limitada al Norte y Sur por fallas sintéticas y antitéticas (figura III.4) y al Oeste y Este por fallas sintéticas principales, que se unen en profundidad al sistema lístrico regional, de igual manera.

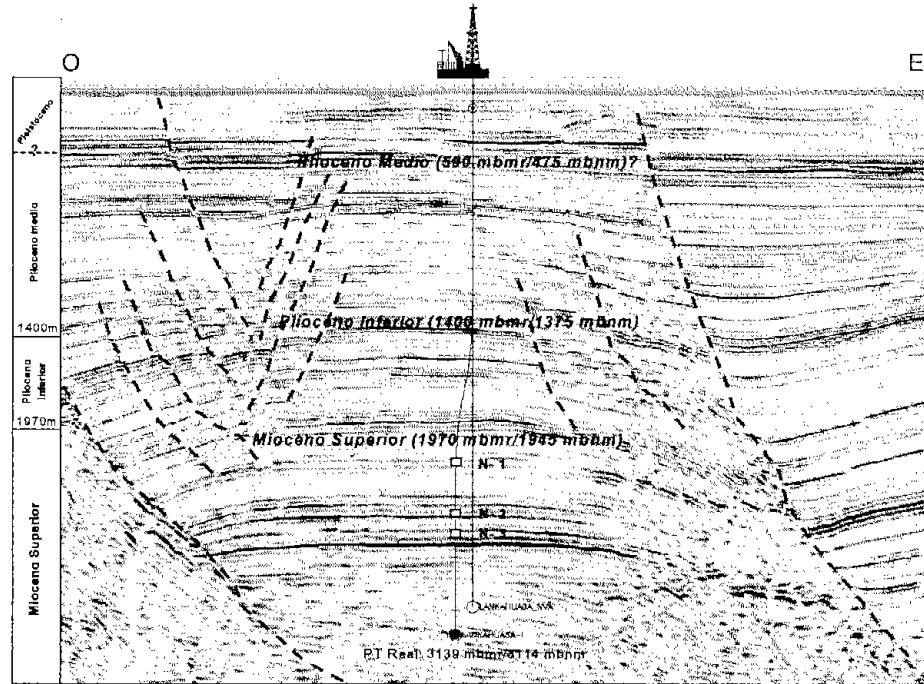


Figura III.3. Línea sísmica con dirección Oeste-Este

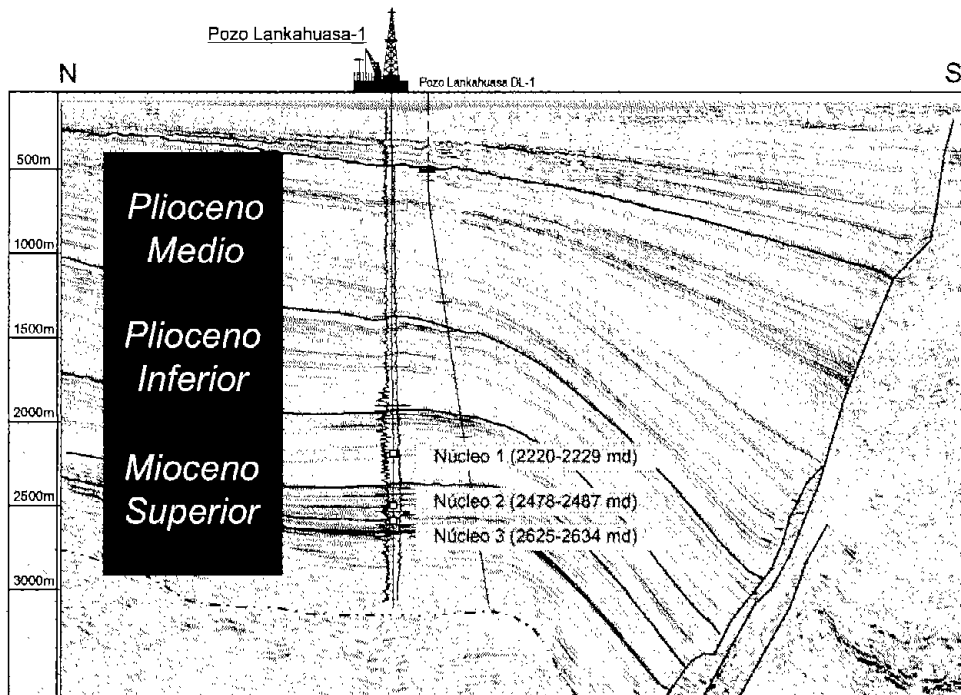


Figura III.4. Línea sísmica con dirección Norte-Sur

III.4. Sistema petrolero

El sistema petrolero se define como el conjunto de elementos y procesos geológicos que permiten que ocurra un yacimiento de hidrocarburos en la naturaleza. Las condiciones necesarias para una acumulación comercial de aceite o gas son: una *roca generadora* madura, que reúna las condiciones necesarias para la génesis de hidrocarburos; una *roca almacenadora*, con una *ruta de migración* entre estas dos rocas y un *sello* impermeable sobre la roca almacenadora; finalmente la roca generadora, almacenadora y el sello, deben estar arregladas para permitir la acumulación de hidrocarburo en lo que se denomina una *trampa*. El reconocimiento de sus facies, sus asociaciones y el estudio de su repartición en una cuenca sedimentaria, son los objetivos esenciales de toda exploración petrolífera; desde el momento que se puede conocer su situación geológica regional, una gran parte de la exploración petrolífera se encuentra resuelta.

El sistema petrolero encontrado en la localidad del pozo Lankahuasa-1 es la siguiente:

III.4.1. Roca generadora

En imágenes sísmicas se observa que algunas fallas pueden estar conectando las zonas potencialmente generadoras con las zonas de cntrampamiento. Así se han propuesto como rocas generadoras a los sedimentos de dos subsistemas: (1) *Jurásico Superior*, con litología de carbonatos arcillosos depositados en ambiente marino anóxico, lo que favoreció la preservación de materia orgánica predominantemente algácea, su distribución es regional en toda la cuenca del Golfo; sus espesores netos generadores se han supuesto sólo por registro de riqueza orgánica que en algunos lugares de la cuenca Tampico-Misantla rebasa los 300 m; su contenido de carbono orgánico varía de los 0.5 a 5% con un promedio de 2% y el kerógeno es de tipo II y (2) *Paleógeno* (Eoceno), con litología de dominio arcilloso depositada en un ambiente marino subóxico de talud y cuenca, que favoreció a la preservación de materia orgánica con predominio maderáceo; su distribución es regional en toda la cuenca; sus espesores netos generadores se suponen por su registro de materia orgánica; en algunos lugares de la cuenca del Golfo rebasan los 750 m. El contenido de carbono orgánico total varía de 0.5 a 5 % con promedio de 1% y el kerógeno es de tipo III. Información reciente del muestreo del fondo marino, reporta que en el área hay indicios de la generación de gas termogénico, además de aceite ligero.

III.4.2. Roca almacenadora

La roca almacenadora está constituida por litarenitas de grano muy fino donde predominan los fragmentos de cuarzo y calizas, las cuales son el objeto de estudio de la presente tesis y son examinadas a mayor detalle en los capítulos consecutivos.

III.4.3. Trampa-Sello

Los eventos tectónicos que dieron lugar a la formación de las trampas en el área, ocurrieron durante el Mioceno Medio y Plioceno. Las trampas se presentan como combinadas, las trampas estructurales las conforman anticlinales roll-over y bloques girados limitados por fallas normales y lístricas a profundidad, que forman parte del sistema distensivo del Golfo de México; mientras que las trampas estratigráficas corresponden a acuñaamientos y cambios de facies.

Los sellos son las secuencias de dominio arcilloso de edad Mioceno-Plioceno que tienen una distribución regional sobre las plataformas. La geometría de los cuerpos arcillosos es de espesor muy variable, pero en general, se pueden considerar buenos sellos.

III.4.4. Sincronía y migración

De acuerdo con los estudios del subsistema generador, se tuvo una época de sepultamiento muy profundo para las rocas jurásicas y cretácicas debida al depósito de potentes paquetes en el Mioceno Superior y Plioceno Inferior, lo que propició que el Jurásico alcanzara una etapa de madurez muy avanzada; al mismo tiempo las rocas terciarias alcanzaron la profundidad suficiente para entrar a la ventana de generación de gas. Ambos efectos fueron sincrónicos con la formación de trampas.

La migración probablemente presenta un esquema de drenaje vertical y lateral, enfocado en dirección Este-Oeste y Sureste-Noreste. Las vías de migración son básicamente los planos de las fallas lítricas regionales.

IV. PETROGRAFÍA

IV.1. Marco teórico

TEXTURA

La textura y la estructura de una roca sedimentaria son determinadas por procesos depositacionales y postdepositacionales. La textura se refiere a:

- Tamaño de grano
- Forma de grano:
 - *Redondez*
 - *Esfericidad*
- Textura superficial
- Orientación
- Empaque
- Porosidad
 - *Porosidad Primaria*
 - *Porosidad Secundaria*
- Permeabilidad
- Madurez textural

Tamaño de grano

Existe una gran variedad de métodos por los cuales uno puede asignarle un tamaño a una partícula. Por ejemplo: en función del diámetro nominal, en función de la velocidad de asentamiento, etc. El intervalo del tamaño de grano de las partículas es casi infinito, desde menores de un micrómetro hasta varios metros de diámetro. Comúnmente, los granos mayores a un centímetro son medidos individualmente con vernier o algún método similar. Y los granos que van de un centímetro a 50 micrómetros de diámetro son medidos haciéndolos pasar por una arreglo de tamices o inyectándolos dentro de una columna de fluido (usualmente agua) para separarlos.

Debido a que las partículas muestran un amplio intervalo de tamaños, es práctico utilizar una escala geométrica o logarítmica para su clasificación. Udden (1898) ideó una escala basada en el factor 2. Modificaciones posteriores hechas por Wentworth (1922) resultaron en la escala de tamaño usada en nuestros días, donde cada intervalo posee un nombre (tabla IV.1).

La modificación más reciente y significativa de la tabla de Wentworth es la transformación logarítmica propuesta por Krumbein (1934). La escala phi (Φ) está basada en el logaritmo negativo con base 2:

$$\Phi = -\log_2 d$$

donde d es el diámetro de la partícula en milímetros.

Tamaño			Nombre de la partícula	
mm	Unidades phi			
2048	---	-11	Muy grande	Grava
1024	---	-10	Grande	
512	---	-9	Mediana	
256	---	-8	Pequeña	
128	---	-7	Grande	
64	---	-6	Pequeña	
32	---	-5	Muy gruesa	
16	---	-4	Gruesa	
8	---	-3	Mediana	
4	---	-2	Fina	
2	---	-1	Muy fina	
1	---	0	Muy gruesa	Lodo
0.5	---	1	Gruesa	
0.25	---	2	Mediana	
0.125	---	3	Fina	
0.0625	---	4	Muy fina	
0.031	---	5	Muy gruesa	
0.016	---	6	Gruesa	
0.008	---	7	Mediana	
0.004	---	8	Fina	
0.002	---	9	Muy fina	
			Arcilla	

Tabla IV.1. Escala de Wentworth para el tamaño de grano.

La uniformidad en el tamaño de grano dentro de una muestra de sedimento es estadísticamente medida por la desviación estándar, denominada en sedimentología como “clasificación” (figura IV.1); ésta mide la diversidad de tamaños de grano y es un parámetro que comúnmente refleja las condiciones existentes durante el depósito del sedimento. Es una indicación de la variedad de procesos y también de su intensidad. Una intensidad muy baja o muy alta produce una baja clasificación. Los procesos intensos y de poca duración como las tormentas, crean mucho movimiento de sedimento y muy poco tiempo para su clasificación. El transporte preferencial de ciertas partículas, incrementa la selección del sedimento.

Las facies sedimentarias presentan comúnmente perfiles verticales característicos, en los cuales el tamaño de grano se hace más fino hacia arriba, más grueso hacia abajo; o permanecen constantes. La determinación de tal variación vertical en el tamaño de grano puede ser extremadamente valioso en el diagnóstico del ambiente depositacional. Por ejemplo, las secuencias de canal generalmente se forman por acreción lateral y muchas arenas de canal presentan en algún grado, perfiles que gradúan a finos hacia arriba, generalmente a partir de una base erosionada. Por otro lado, las arenas tipo “barra” casi siempre muestran perfiles con tamaño de grano más grande hacia arriba, frecuentemente coronadas por un cambio de facies abrupto a material de grano fino. Algunas otras facies, por ejemplo, arenas de corrientes trenzadas, crestas de arena de marea y canales submarinos, frecuentemente presentan perfiles en “bloque” en donde el tamaño de grano

permanece relativamente constante. Sin embargo, es importante recordar que la variación vertical en el tamaño del grano puede deberse a más de un proceso o marco sedimentario.

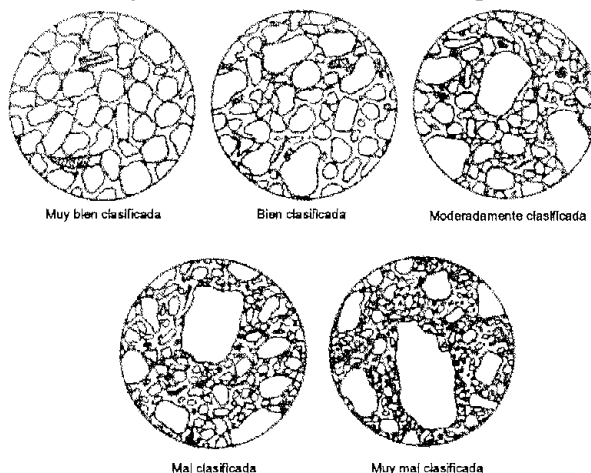


Figura IV.1. Tipos de clasificación

Forma de grano

Las partículas sedimentarias despliegan una gran variedad de formas geométricas. Esta variación es debido a una combinación de la estructura interna, el origen y la historia de la partícula. Algunas partículas son simples y simétricas, mientras que otras son extremadamente complejas.

La redondez de una partícula se refiere a la agudeza o angulosidad de sus aristas. Ambas, la abrasión física y las reacciones químicas contribuyen con la redondez, sin embargo la abrasión es generalmente la más importante de las dos. La redondez puede ser medida a través de secciones o imágenes proyectadas de la partícula. Un patrón de comparación fue creado por Powers (1953), quien desarrolló un gráfico con 6 jerarquías (figura IV.2), designándoles nombres diferentes que van desde “muy anguloso” hasta “bien redondeado”. Folk (1955) propuso una conversión logarítmica llamada la escala rho (ρ), cuyo intervalo va de 0 a 6 y corresponde con las categorías descritas por Powers.

El término esfericidad se refiere al grado en el que una partícula se aproxima a una esfera y posee una influencia del origen de la partícula.

Cabe destacar que la redondez y la esfericidad pueden no estar relacionadas en una partícula dada. Esto es, algunos objetos perfectamente redondeados pueden mostrar una baja esfericidad y algunos objetos casi esféricos pueden ser muy angulosos. Por supuesto, muchas partículas pueden ser ambas, es decir, bien redondeadas y esféricas.

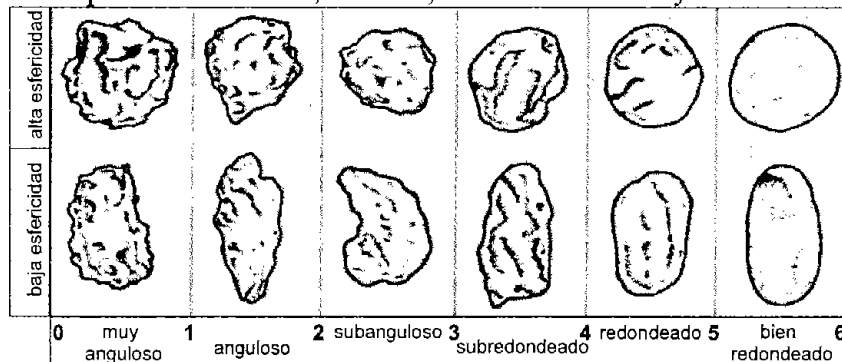


Figura IV.2. Clasificación de Powers.

Textura superficial

La textura superficial de partículas del tamaño de arena y grava puede ser afectada por fenómenos físicos y químicos durante el transporte e in situ después de la acumulación y continuar después de la cementación de la roca. La causa principal de marcas superficiales en una partícula es el impacto de ésta contra otra. Investigaciones recientes han retomado estas características para tratar de establecer texturas superficiales características como indicadores particulares de ambientes de depósito. Existe una gran variedad de características superficiales presentes en partículas del tamaño de arena, que podrían ser estudiadas con ayuda de un microscopio sencillo o con uno electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Aunque muchas texturas ya se han relacionado con ambientes de depósito, no hay un acuerdo general que defina su significado. Las reacciones químicas con el agua subterránea u otros fluidos son los fenómenos diagenéticos más importantes en la producción de texturas superficiales. Como resultado del movimiento de las partículas sedimentarias de un ambiente depositacional a otro, en conjunto con las marcas producidas diagenéticamente, es muy difícil o casi imposible determinar un ambiente de depósito por análisis de partículas individuales pertenecientes a una roca.

Orientación, empaque, porosidad, permeabilidad

Las acumulaciones de sedimento muestran características que pueden o no estar relacionadas con el tamaño y forma de las partículas constituyentes. El arreglo de las partículas sedimentarias en el espacio se denomina orientación de un depósito y la forma de las partículas sedimentarias individuales es su factor más importante. Por ejemplo, es común que partículas no esféricas presenten un arreglo preferencial con su eje longitudinal paralelo. En cambio, las esferas son equidimensionales y de esta manera no presentan ninguna orientación espacial particular.

La orientación resulta de procesos depositacionales, algunos de los cuales incrementan el arreglo preferencial de las partículas y otros que dan una orientación completamente al azar. Todos los sedimentos que tienen uno o dos de sus ejes mayores a los demás, son susceptibles de tener una orientación preferencial.

Un aspecto de la orientación que no depende necesariamente de la forma es el empaque, la densidad espacial de las partículas en una acumulación de sedimento, y que puede ser en forma cúbica, rómbica, etc.

Muchas acumulaciones de sedimento tienen una combinación de lodo con material más grueso, la cual causa que las partículas gruesas sean separadas espacialmente y se encuentren flotando dentro del material más fino. La figura IV.3 ilustra los casos extremos de empaque, también sirve como un buen ejemplo del intervalo de porosidad.

La porosidad es definida como el porcentaje de espacios vacíos en el volumen total de la roca. Existe un gran intervalo de porosidades entre sedimentos y rocas. Variables importantes incluyen la clasificación y la cantidad de matriz o cemento. La porosidad de partículas esféricas, bien clasificadas en un arreglo cúbico es 48%, en cambio para un arreglo rómbico ésta se reduce a un 26% (Blatt et al., 1980).

Existen tres tipos principales de porosidad: interconectada, conectada y aislada. La porosidad interconectada utiliza los múltiples pasajes que conectan los poros. La porosidad conectada tiene solo un pasaje por el que se conecta poro con poro y en la porosidad aislada no se tiene conexión entre poros.

Los poros conectados e interconectados representan la *porosidad efectiva*, porque los fluidos se pueden extraer de ellos.

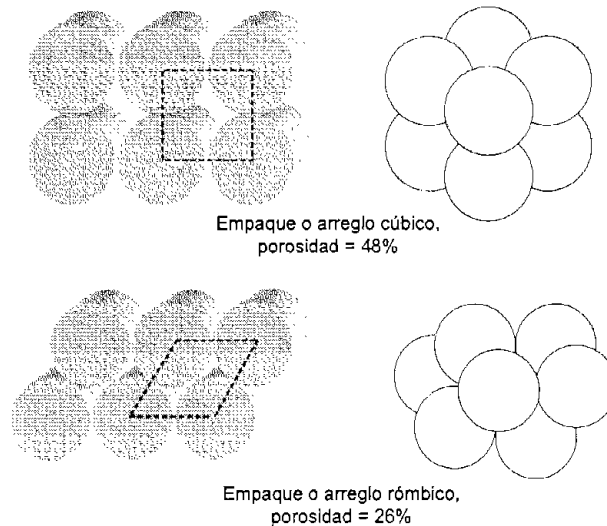


Figura IV.3. Empaques y porosidades

Un sedimento compuesto de partículas de minerales arcillosos puede tener hasta 90% de porosidad, porque estas partículas en forma de hojuelas llegan a poseer un empaque muy abierto. La compactación puede reducir fuertemente esta porosidad, creando una orientación preferencial de las partículas.

La porosidad puede ser clasificada en dos tipos principales de acuerdo a su origen (Murray, 1960).

- La *porosidad primaria* es formada cuando los sedimentos son depositados y se puede dividir en dos tipos: *porosidad intergranular* o *interpartícula*, la cual se presenta entre los granos de un sedimento; y la *porosidad intragranular* o *intrapartícula*, la cual se presenta dentro de los mismos granos del sedimento. En las areniscas la porosidad más común es la intergranular.
- La *porosidad secundaria* se forma después del depósito. Se divide en: *porosidad fenestral*, *intercristalina*, *por disolución* y *por fracturamiento*. Ésta última puede resultar en una alta producción inicial del pozo, seguida de una rápida declinación en su producción.

Sedimentos pobremente clasificados que combinan lodo con arena y grava, muestran valores bajos de porosidad, por obvias razones.

La *permeabilidad* es la habilidad de un material de transmitir fluidos sin alterar su estructura y es controlada por el tamaño de los espacios porosos y el grado en el que están interconectados. La viscosidad y el gradiente de presión de un fluido también son factores importantes. Es fácil ver como la permeabilidad está relacionada con el empacamiento, la porosidad y el tamaño de grano. En general, los sedimentos gruesos son más permeables que los sedimentos finos. Aunque las arcillas pueden tener arriba del 90% de porosidad,

son impermeables debido a los pequeños espacios porosos y la falta de conexión entre ellos. Las arenas y gravas, por otro lado, muestran valores altos de permeabilidad. La permeabilidad de un sedimento puede cambiar drásticamente con el tiempo, no sólo por la compactación y la pérdida resultante de espacio poroso sino también por la precipitación de cemento que ocupa el espacio poroso (diagénesis).

Madurez textural

El concepto de madurez textural fue desarrollado por Folk (1951) para integrar varias propiedades texturales de los sedimentos. Esta combinación de propiedades provee una secuencia de escenarios que son el resultado del suministro de energía durante el depósito. Es una herramienta útil en la interpretación de la naturaleza física del ambiente en el cual el sedimento se acumuló.

Hay cuatro escenarios en la clasificación de madurez textural de Folk: inmaduro, submaduro, maduro y supermaduro (figura IV.4). Los sedimentos inmaduros contienen una cantidad importante de finos, están pobremente clasificados y son angulosos. Ellos representan depositación en un ambiente donde hay poca o nula energía mecánica para separar las partículas. Sedimentos submaduros disminuyen su porcentaje de lodo, pero son pobremente clasificados y angulosos. Sedimentos maduros indican granos bien clasificados y limpios de finos, pero angulosos. Sedimentos supermaduros son tanto bien clasificados como bien redondeados. Ellos indican un alto nivel de intensidad y transporte de sedimento. La madurez textural es una guía de condiciones depositacionales, por tanto los fenómenos diagénéticos son ignorados (Folk, 1974).

Algunas excepciones de este esquema son llamadas "inversiones texturales". Ellas son el resultado de sedimentos mezclados de dos ambientes o fuentes diferentes.

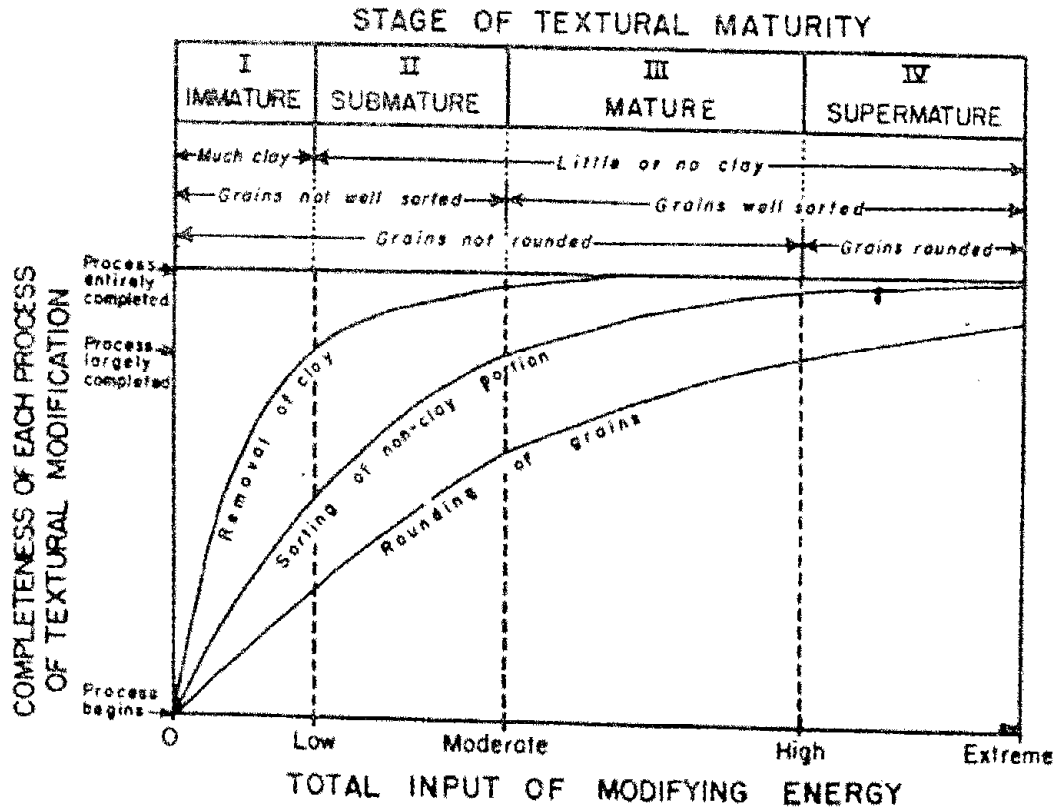


Figura IV.4. Diagrama de Folk para la madurez textural.

MINERALOGÍA

La composición de las rocas sedimentarias es un reflejo de:

- El clima, la geología, la distancia y la topografía de la roca madre o zona de origen.
- Los mecanismos de transporte
- La diagénesis

Los sedimentos y las rocas sedimentarias están constituidos por unos cuantos minerales que son los productos relativamente estables de la erosión. La abundancia de las partículas terrígenas es dependiente de su disponibilidad, durabilidad y estabilidad química (Folk, 1974).

Cuarzo. El mineral terrígeno dominante es el cuarzo, aunque algunos sedimentos contienen poco o inclusive carecen del mismo. La forma y el arreglo de los cristales, así como sus propiedades ópticas, pueden dar pistas de la naturaleza de la roca fuente, de la cual se derivó (Folk, 1974).

Feldespatos. Tanto el feldespato potásico como la plagioclasa son comunes en algunos sedimentos. Debido a su relativa inestabilidad química, la plagioclasa es menos común y está presente en grandes cantidades sólo en circunstancias específicas de aporte y proximidad de la roca fuente. El feldespato potásico, usualmente ortoclasa o microclina, es abundante en muchos sedimentos y fácil de reconocer en tamaño de arena o partículas más gruesas. Algunas interpretaciones importantes son posibles debido a una inspección detallada de las partículas de feldespato en un sedimento o roca sedimentaria. Por ejemplo, feldespato fresco, pequeño en comparación con los granos asociados de cuarzo, es generalmente interpretado como resultado de condiciones áridas, mientras que feldespato alterado es interpretado como condiciones húmedas.

Fragmentos de roca. Son, por mucho, los constituyentes primarios más diversos de los sedimentos terrígenos. Existen tres tipos principales de fragmentos de roca: metamórficos, volcánicos y sedimentarios (Folk, 1974). También es posible observar partículas de fragmentos de rocas plutónicas, sin embargo son poco comunes y usualmente más gruesas que la arena. Dentro de la categoría metamórfica, las partículas de filita y esquisto son las más comunes en tamaño de arena, mientras que los fragmentos de gneiss son generalmente más grandes y relativamente raros en arenas, pero comunes en gravas. Los fragmentos de rocas sedimentarias se presentan en una gran variedad de formas y son comunes con fragmentos de lutita, pedernal y carbonatos. El análisis de los fragmentos es la base para el reconocimiento de las rocas fuente.

Minerales arcillosos. El lodo contenido en los terrígenos es dominado por minerales arcillosos, aunque también pueden presentarse cuarzo, feldespato y otros constituyentes en partículas muy pequeñas. Los minerales comunes presentes son la illita, kaolinita, clorita y montmorillonita. La determinación de las partículas minerales puede ser importante en la interpretación de sus orígenes; por ejemplo, la illita es comúnmente producto del intemperismo del feldespato potásico y la montmorillonita de una alteración de material volcánico.

Minerales accesorios. Son representados por pequeños porcentajes de otros minerales, frecuentemente minerales pesados (zircón, rutilo, turmalina) y micas.

Algunos sedimentos que no son derivados de la degradación de rocas preexistentes, son precipitados directamente, tanto de soluciones acuosas como de material biógeno o piroclástico.

ORIGEN O PROCEDENCIA

Probablemente el papel más valioso que juegan las partículas terrígenas en la interpretación de las condiciones geológicas antiguas es el indicar la composición y las características de la roca fuente. Ciertos minerales o conjunto de éstos pueden proveer de pistas, no solo de la composición mineral de la roca fuente o de sus condiciones de formación, sino también de su proximidad con respecto al lugar de depósito en el que las partículas se acumulan.

Los minerales dominantes o los minerales accesorios presentes pueden ser críticos en establecer la procedencia de un sedimento. Por tanto, los estudios de procedencia intentan revelar la naturaleza, composición, identidad y dimensiones de la roca madre, el relieve y el clima en el área fuente y en su sentido más amplio incluye el transporte.

Autores como Dickinson (1986) encontraron una relación muy estrecha entre la composición de las areniscas y el ambiente tectónico al que se asocian las grandes cuencas sedimentarias donde se depositan. A partir de esta observación, dicho autor generó una serie de diagramas ternarios basados en el porcentaje de cuarzo, feldespato y líticos de las rocas. En general dichos diagramas son resumidos en la tabla IV.2.

TIPO DE PROCEDENCIA	AMBIENTE TECTÓNICO	COMPOSICIÓN DE ARENISCAS
Cratón estable	Plataforma estable o en el interior del continente	Areniscas cuarzosas (ricas en Qt) con altas relaciones Qm/Qp y K/P
Basamento levantado	Borde de rift o ruptura transforme	Areniscas cuarzo-feldespáticas (ricas en Qm y F) con bajas concentraciones de Lt y relaciones similares de Qm/F y K/P similares a las de la fuente de aporte
Arco magmático	Arco de isla o arco continental	Areniscas volcánoclasticas y feldespatolíticas (ricas en F) con altas relaciones de P/K y Lv/Ls. Si están expuestas rocas plutónicas entonces las areniscas son cuarzo-feldespáticas (ricas en Qm y F)
Orógeno reciclado	Complejos de subducción o cinturones de pliegues y cabalgaduras	Areniscas cuarzolíticas (ricas en Qt y Lt) con bajas concentraciones de F y Lv y relaciones variables de Qm/Qp y Qp/Ls

Tabla IV.2. Relación entre la procedencia y composición de areniscas. El tamaño de sedimento considerado en el análisis tiene que ser mayor a 0.0625mm. Qt= cuarzo total, Qm= cuarzo monocristalino, Qp= cuarzo policristalino, F= feldespato total, K= feldespato potásico, P= plagioclasa, Lt= fragmentos líticos totales, Lv= fragmentos líticos volcánicos y Ls= fragmentos líticos sedimentarios.

La aplicación de la geoquímica en los estudios de procedencia de sedimentos terrígenos ha tenido un gran desarrollo en los últimos años y ha complementado enormemente la información obtenida por medio de la petrografía. En las últimas dos décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la composición química de las rocas clásticas (elementos mayores, trazas, tierras raras y últimamente de isótopos) y de los cambios que ocurren a lo largo del ciclo sedimentario y de la roca que resulta de la litificación de dicho sedimento.

DIAGÉNESIS

Una vez que los sedimentos se han acumulado en su lugar de depósito, una gran variedad de cambios postdepositacionales comienzan a presentarse. El término **diagénesis** es usado para describir todos estos cambios, físicos y químicos, hasta antes del metamorfismo. Algunos aspectos del empaque son retomados y designados como procesos diagenéticos tempranos. Algunos procesos diagenéticos alteran la naturaleza composicional y textural de estos depósitos y pueden ser importantes cuando se hagan interpretaciones de ambientes depositacionales. Además, hay que tener en cuenta la afirmación de Hayes (1979), que textualmente dice: “la evolución a seguir por la diagénesis de areniscas en una cuenca sedimentaria estará controlada por factores tales como procedencia de los componentes, ambiente deposicional y asentamiento tectónico. Estos factores están estrechamente relacionados con la composición y textura de las areniscas, que es lo que en último término gobierna las reacciones minerales y la velocidad de flujo de los fluidos”.

Principales procesos diagenéticos:

Compactación. Consiste en una reducción del volumen de la roca por reducción del volumen de poros (disminución de la porosidad), como consecuencia del incremento de presión. El grado de compactación que puede alcanzar el sedimento es muy variable en función de la naturaleza del mismo.

Cementación. Es el fenómeno diagenético más importante y consiste en la precipitación, en los poros, de sustancias químicas disueltas en el agua que circula a través del sedimento. La cementación rellena parcialmente los poros (disminuye la porosidad), puede cortar la comunicación entre ellos (disminuye la permeabilidad) y aglutina a los granos minerales, transformándolos en roca. El cemento es un factor decisivo, ya que representa un porcentaje importante del volumen de la roca sedimentaria.

Disolución. Se refiere tanto al lavado de los diferentes granos del esqueleto o de la matriz como a la disolución de los cementos primarios y es la causa principal de porosidad secundaria.

Recristalización. Comprende las distintas transformaciones que se producen entre un mineral y el mismo o un polimorfo que provocara la aparición de nuevos cristales de la misma composición pero de distinto tamaño y/o forma.

Reemplazamiento. Representa un cambio de mineralogía entre el nuevo material resultante y el reemplazado, pudiendo conservarse las texturas deposicionales y las microestructuras de los granos o cementos transformados.

Autigénesis (de minerales arcillosos).

Algunos factores que influyen en la diagénesis:

- Velocidad de sedimentación,
- Contenido y composición de los fluidos de los sedimentos,
- Profundidad de sepultamiento, etc.

Tomando en cuenta la diagénesis en las areniscas, las arenas modernas son depositadas con porosidades que van de 40 a 50%. En general, esta porosidad es perdida con el incremento de la profundidad, pero existen otros factores que controlan el decremento en la porosidad de un depósito, como: la composición química del sedimento, el gradiente térmico (que es directamente proporcional al decremento de porosidad, Galloway, 1974), la presencia de hidrocarburos (Fuchtbauer, 1967) y de minerales arcillosos autigénicos, por ejemplo, los cristales de kaolín ocupan el espacio poroso, pero no afectan significativamente la permeabilidad de la roca, debido a su hábito; en cambio, una pequeña cantidad de illita puede afectar fuertemente la permeabilidad, bloqueando los pasajes existentes entre los poros.

En ocasiones ocurren situaciones opuestas a la pérdida de porosidad y permeabilidad dentro de un depósito de arena. Se pueden encontrar espacios porosos superiores a los que normalmente se formarían originalmente. Esto es debido a la disolución de los granos, del cemento calcáreo o de los fragmentos de conchas y por tanto, la porosidad se ve incrementada.

CLASIFICACIÓN DE ARENISCAS

Se adopta en este capítulo la definición de arenisca dada por Jackson & Bates (1987), es decir, “*roca clástica, litificada, constituida por granos de dimensión arenosa de cualquier origen y composición*”.

Aunque se han publicado diversas formas de clasificar a las rocas terrígenas, cada una de ellas destinada al estudio y análisis de sus diferentes características, como por ejemplo Dott en 1964 o Valloni en 1991, el problema de obtener una descripción óptica cuantitativa de una textura arenosa, que permita analizar su procedencia y que por tanto, conduzca a realizar una buena y amplia petrología sedimentaria yace en la selección de un método que no solo sea descriptivo, sino que también pueda tener en cuenta los aspectos genéticos.

Sin entrar a ponderar las clasificaciones existentes por no ser el objetivo de este trabajo, la clasificación composicional de las areniscas que se ha adoptado fue presentada y utilizada por R. L. Folk y Pettijohn y ha sido desarrollada de clasificaciones previas propuestas por Krynine (1948), Folk (1951, 1954, 1956, 1960) y McBride (1963) y tiene atributos tanto descriptivos como genéticos, además de ser relativamente sencilla y útil.

La clasificación de Folk (1974) es generalmente usada para la denominación de areniscas. En esta clasificación (figura IV.5) existen tres constituyentes principales: cuarzo, feldespato y fragmentos de roca. Una roca compuesta enteramente de cuarzo cae dentro de un punto designado para ese constituyente dentro de un diagrama ternario, una equivalencia entre los tres constituyentes principales es el centro y así sucesivamente. Los minerales arcillosos están presentes como matriz y son incluidos en la parte textural del nombre de la roca.

El diagrama triangular con los tres miembros finales, está dividido en siete categorías, con Cuarzoarenita, Litarenita y Arcosa como los nombres de roca para cada uno de sus vértices. Son usadas modificaciones apropiadas para rocas que caen dentro de otra categoría composicional; por ejemplo, una arcosa lítica indica menos del 75% de cuarzo y una relación de feldespato/fragmentos de roca entre 3:1 y 1:1. Obviamente, varios feldespatos y fragmentos de roca pueden estar presentes.

Para definir el nombre de una roca con mayor precisión, varias modificaciones y adiciones han sido necesarias. Éstas incluyen el tamaño de grano (ej: arenisca de grano medio), madurez textural (ej: madura), minerales accesorios (ej: micácea) y cementante (ej: cementante calcáreo); y forman las cinco partes del nombre completo de una roca (Folk, 1974): Cuarzoarenita de grano medio, madura, micácea con cementante calcáreo. En muchas ocasiones no es posible o práctico incluir a todas las partes, especialmente en el campo.

Después de familiarizarse con esta clasificación, es posible reconocer cómo la roca fuente y la tectónica están relacionadas dentro del panorama. Esto le da aspecto genético a la clasificación.

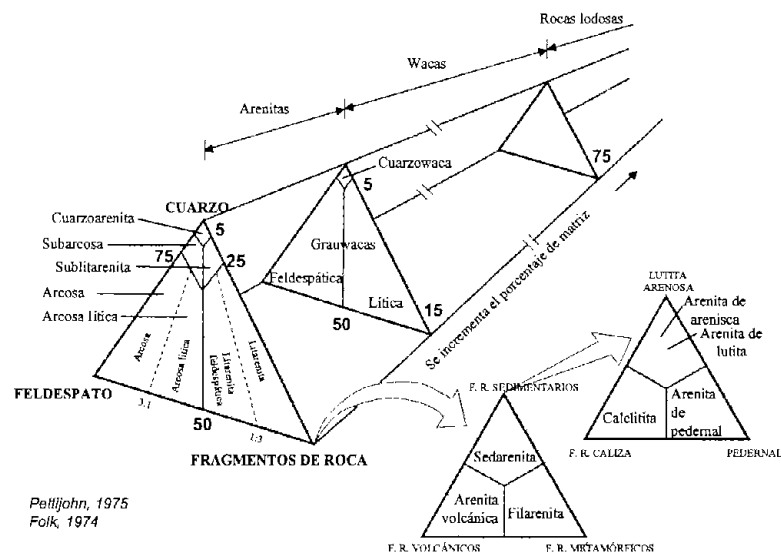


Figura IV.5. Clasificación de Folk para las areniscas.

IV.2. Descripciones

La finalidad de todo estudio de petrología sedimentaria es extraer la mayor información posible de los diferentes componentes de las rocas sedimentarias (esqueleto, matriz y cemento) para conocer la historia que han sufrido las mismas y poder así llevar el análisis de cuenca a su máxima expresión y con él abordar la reconstrucción de la paleogeografía. Se entiende como región paleogeográfica a el área en que se produce la erosión de los materiales (cuenca de erosión), el área de transporte de los sedimentos (cuenca de transporte) y finalmente, el área donde éstos van a parar y se depositan (cuenca de sedimentación). El análisis de las dos primeras (área fuente y cuenca de transporte) a partir de las rocas sedimentarias entra de lleno en el campo de los estudios de procedencia, mientras que el análisis de las características texturales y composicionales de las mismas es lo que se conoce clásicamente como petrografía. La unión de estas dos disciplinas sería el campo de acción de la Petrología Sedimentaria, que junto con la Estratigrafía física, el análisis de facies y la tectónica otorgan al geólogo las herramientas más eficaces para abordar la reconstrucción de la región paleogeográfica.

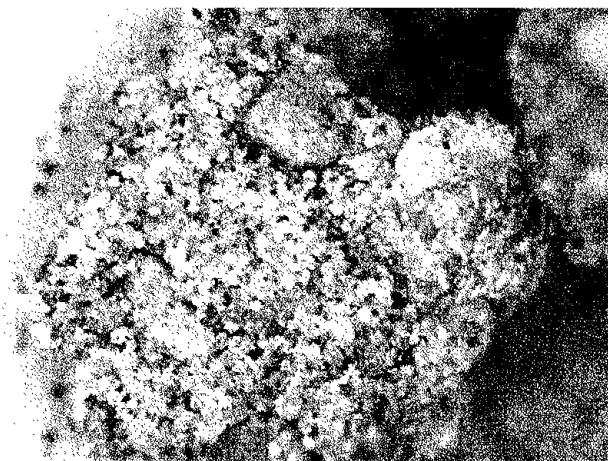
Los estudios son primeramente divididos en: Descripciones megascópicas y Descripciones microscópicas; y posteriormente, en cada uno de ellos se analizan las muestras de canal recolectadas del lodo de perforación y que pertenecen a un intervalo correspondiente a una de las cinco pruebas de producción que se le realizaron al pozo, además de los núcleos tanto de fondo, como de pared.

IV.2.1. Megascópicas

IV.2.1.1. Muestras de canal

Las muestras de canal obtenidas de las pruebas de producción del pozo Lankahuasa-1, fueron fotografiadas (fotografías IV.1.-IV.4.) y se describen a continuación:

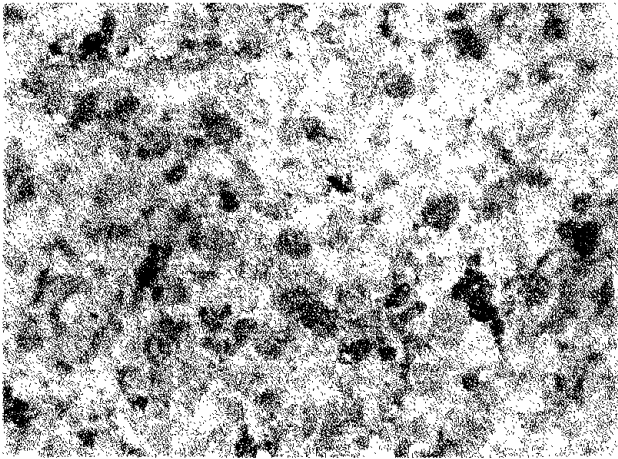
PRUEBA DE PRODUCCIÓN 1 (2652-2664 m)



Fotografía IV.1.

Profundidad: 2655 m.

Litarenita (o probablemente sublitarenita) fina. Principales componentes: cuarzo, algunos fragmentos de roca (caliza e ígnea), algunos de los cuales son del tamaño de arena gruesa y escasos feldespatos. Sin matriz y muy poca cementación. Deleznable.

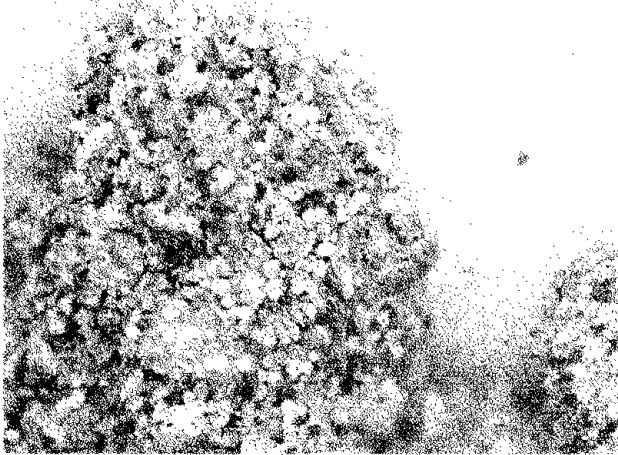


Fotografía IV.2.

Profundidad: 2660 m.

Grauwaca lítica a litarenita fina. Principales componentes: cuarzo, fragmentos de roca (caliza e ígnea), escasos feldespatos y matriz calcáreo-arcillosa.

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 2 (2573-2592 m)

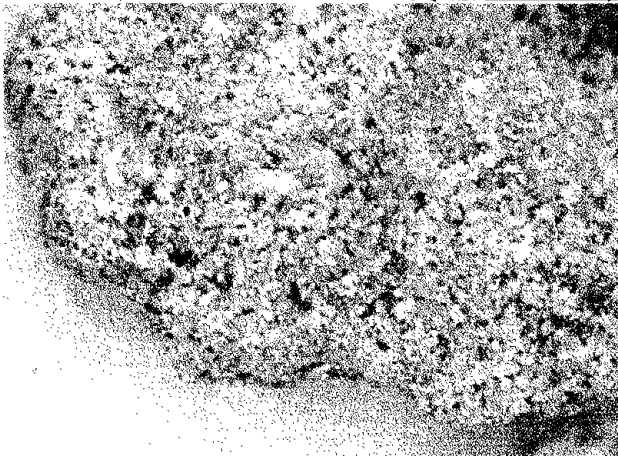


Fotografía IV.3.

Profundidad: 2580 m.

Litarenita (o probablemente sublitarenita) fina. Principales componentes: cuarzo, algunos fragmentos de roca (caliza e ígnea) y escasos feldespatos. Sin matriz y muy poca cementación. Deleznable.

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 4 (2428-2439 m)



Fotografía IV.4.

Profundidad: 2430 m.

Litarenita fina. Principales componentes: cuarzo, fragmentos de roca (caliza e ígnea), escasos feldespatos y algo de matriz calcáreo-arcillosa.

IV.2.1.2. Núcleos

Para el Pozo Lankahuasa-1, se cortaron 3 núcleos de fondo en los intervalos de 2220 a 2229 m (fotografías IV.5. y IV.6.), de 2478 a 2487 m (fotografías IV.7., IV.8. y IV.9.) y de 2625 a 2634 m (fotografías IV.10., IV.11. y IV.12.); con un

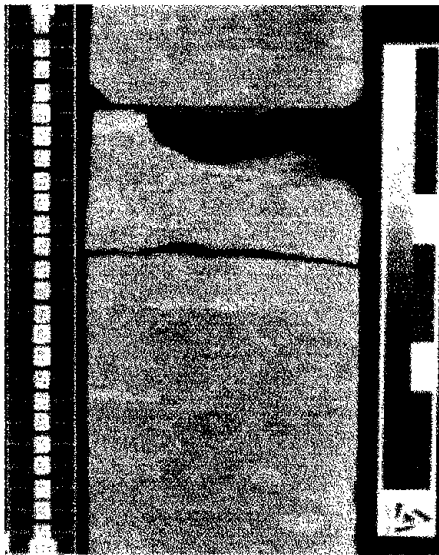
100% de recuperación cada uno y todos ellos dentro del intervalo de edad Mioceno Superior. También se cortaron 9 núcleos de pared a profundidades de: 1382, 1476, 1586, 1688, 1704, 1728, 1736, 1779 y 1806 metros, de los cuales sólo se recuperaron los 4 primeros.

NÚCLEO DE FONDO 1 (2220-2229 m)

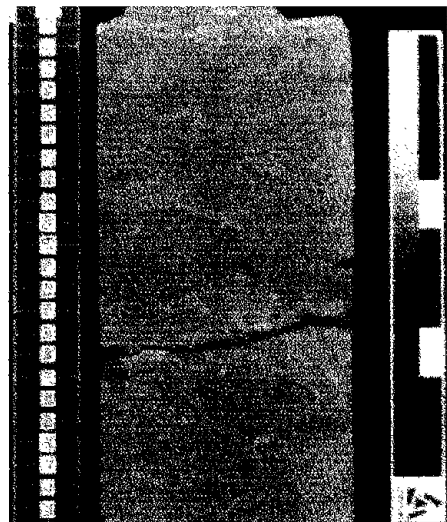
Arenisca de color claro, de grano de arena muy fina, constituido de cuarzo, feldespato, granos negros de pedernal/líticos, de subangulosos a subredondeados, con clasificación moderada a buena, masiva con matriz arcillosa de color pardo grisáceo y cemento de calcita abundante, trazas de fragmentos indistintos de bioclastos, buena porosidad intergranular; entremezclada de forma compleja con unidades depositacionales típicamente delgadas de lutitas de color gris oscuro a gris verdoso oscuro.

Los sedimentos en el núcleo exhiben ciclos delgados, de 1.5 a 2.0 metros de espesor, indistintos, grano-crecientes, pero no se observa ninguna tendencia general en el tamaño de grano.

La pirita autigénica finamente diseminada se observa a través del intervalo nucleado, y es más evidente en las lutitas de color más oscuro y en los fragmentos de plantas. Unas cuantas capas de arenisca más libres de arcilla están cementadas con calcita.



Fotografía IV.5.
Profundidad: 2220.50 m
Fragmento del núcleo de fondo 1.



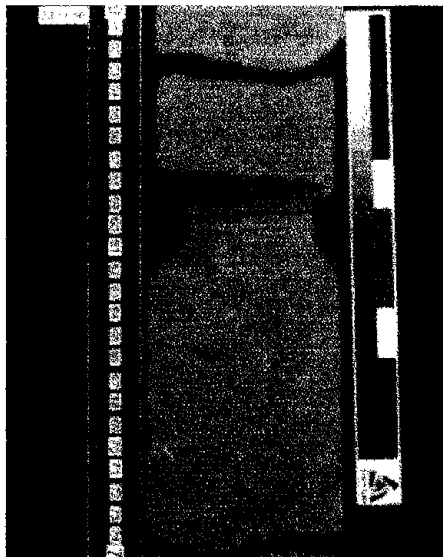
Fotografía IV.6.
Profundidad: 2224.2 m
Fragmento del núcleo de fondo 1.

NÚCLEO DE FONDO 2 (2478-2487 m)

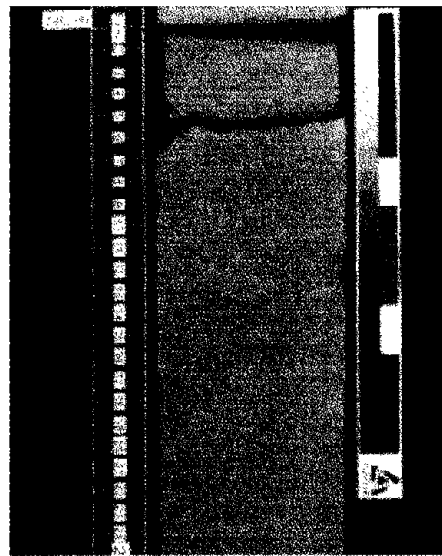
Arenisca de color claro, de grano de arena muy fina, constituido de cuarzo, feldespato, granos negros de pedernal/líticos, de subangulosos a subredondeados, con clasificación moderada a buena, masiva con matriz arcillosa de color pardo grisáceo y cemento de calcita abundante, trazas de fragmentos indistintos de bioclastos, buena porosidad intergranular; entremezclada de forma compleja con unidades depositacionales típicamente delgadas de lutitas de color gris oscuro a gris verdoso oscuro.

Los sedimentos en el núcleo exhiben ciclos delgados, de 1.5 a 2.0 metros de espesor, indistintos, grano-crecientes, pero no se observa ninguna tendencia general en el tamaño de grano.

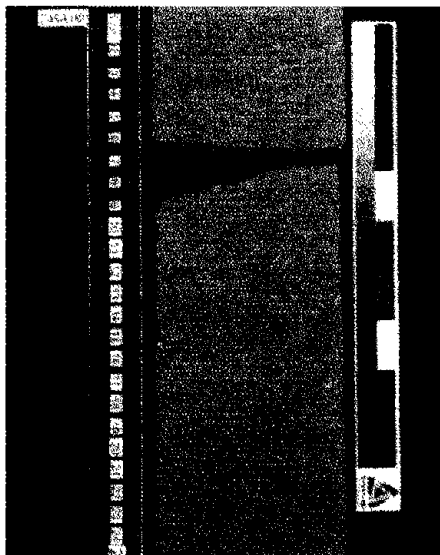
La pirita autigénica finamente diseminada se observa a través del intervalo nucleado, y es más evidente en las lutitas de color más oscuro y en los fragmentos de plantas. Unas cuantas capas de arenisca más libres de arcilla están cementadas con calcita.



Fotografía IV.7.
Profundidad: 2479.5 m
Fragmento del núcleo de fondo 2.



Fotografía IV.8.
Profundidad: 2482.0 m
Fragmento del núcleo de fondo 2.



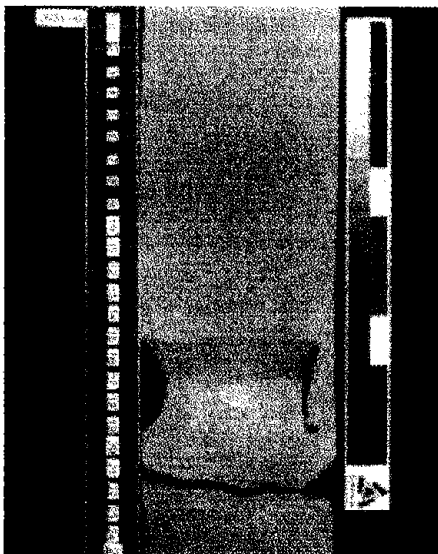
Fotografía IV.9.
Profundidad: 2484.0 m
Fragmento del núcleo de fondo 2.

NÚCLEO DE FONDO 3 (2625-2634 m)

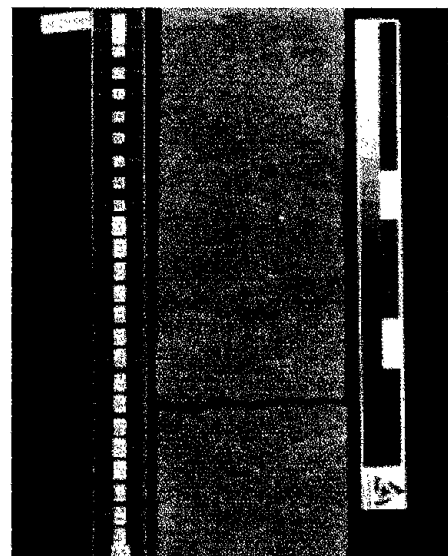
Arenisca de color claro, de grano de arena muy fina, constituido de cuarzo, feldespato, granos negros de pedernal/líticos, de subangulosos a subredondeados, con clasificación moderada a buena, masiva con matriz arcillosa de color pardo grisáceo y cemento de calcita abundante, trazas de fragmentos indistintos de bioclastos, buena porosidad intergranular; entremezclada de forma compleja con unidades depositacionales típicamente delgadas de lutitas de color gris oscuro a gris verdoso oscuro.

Los sedimentos en el núcleo exhiben ciclos delgados, de 1.5 a 2.0 metros de espesor, indistintos, grano-crecientes, pero no se observa ninguna tendencia general en el tamaño de grano.

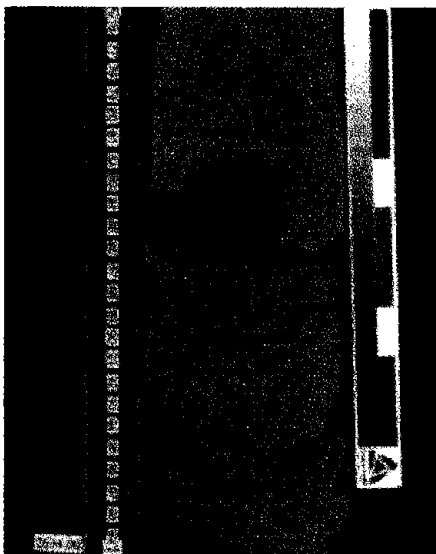
La pirita autigénica finamente diseminada se observa a través del intervalo nucleado, y es más evidente en las lutitas de color más oscuro y en los fragmentos de plantas. Unas cuantas capas de arenisca más libres de arcilla están cementadas con calcita.



Fotografía IV.10.
Profundidad: 2626.0m
Fragmento del núcleo de fondo 3.



Fotografía IV.11.
Profundidad: 2629.0 m
Fragmento del núcleo de fondo 3.



Fotografía IV.12.
Profundidad: 2634.0 m
Fragmento del núcleo de fondo 3.

IV.2.2. Microscópicas

Dentro de la metodología que se desarrolla para el análisis de muestras entra la elaboración de las láminas delgadas, donde primero se limpiaron las esquirlas con solventes para remover fluidos del espacio poroso, después se les aplicó una solución epóxica para asegurar la cohesión de la muestra durante el proceso en el que se pule la sección. Se agrega una tinta azul a la solución epóxica para resaltar los espacios porosos. Cada una de las muestras se colocó en un portaobjetos y se desbastó hasta obtener un espesor de 30 micrómetros. Para facilitar la identificación de cementos carbonatados, se sumergieron las muestras en una tinta compuesta de alizarina roja y ferricianina de potasio. Con esta técnica se resalta la calcita en color rosa, la dolomita ferrosa en color azul oscuro, y la calcita ferrosa en color morado. Además cabe mencionar que la terminología de la textura carbonatada se utilizó de acuerdo con la clasificación de Dunham (1962).

La caracterización cuantitativa de la textura, mineralogía y porosidad de las muestras, se obtuvo mediante el “conteo de puntos - análisis modal”. El conteo de los puntos está basado en la identificación de 300 puntos equidistantes entre sí, en una red cuadrada, utilizando una contadora automática y una unidad de registro de doce canales. Bajo cada uno de los 300 puntos indicados por el ocular del microscopio, se identifica el mineral, el tipo de porosidad y la textura observada.

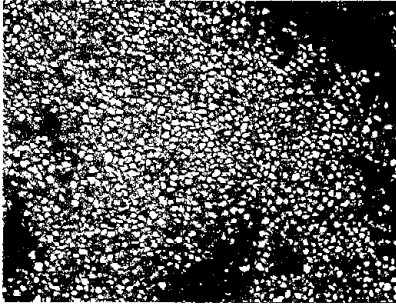
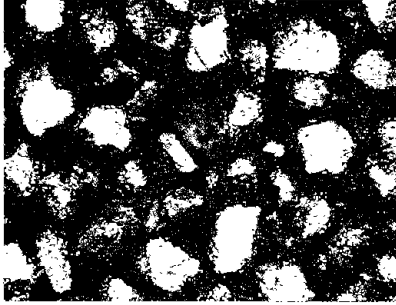

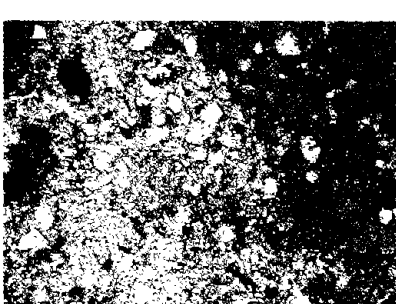
Las muestras para la Difracción de Rayos-X están sujetas a limpieza de hidrocarburos y secado antes de moler. La muestra molida se pesa, se pasa por agua y se trata con una mezcladora sónica. El líquido semi-sólido que resulta se centrifuga para fraccionar la muestra en cuatro (4) micrómetros. La muestra suspendida con partículas menores a 4 micrómetros se guarda. La fracción de la muestra con partículas suspendidas mayores a 4 micrómetros se seca y se pesa para determinar el porcentaje en peso de la fracción del tamaño limo y arcilla. La porción de la muestra con partículas menores a 4 micrómetros se prepara con una sustancia de plata pura para orientar las partículas de arcilla. La muestra se coloca en estado seco y se somete al análisis de Rayos-X, después se realiza un tratamiento con vapor de glicol-etileno durante 24 horas y se vuelve a someter la muestra a los Rayos -X.

La fracción de la muestra con partículas suspendidas mayores a 4 micrómetros se procesa y somete a los Rayos -X. Se analizaron los difractogramas para obtener el contenido mineral de la muestra utilizando un algoritmo para procesar perfiles.

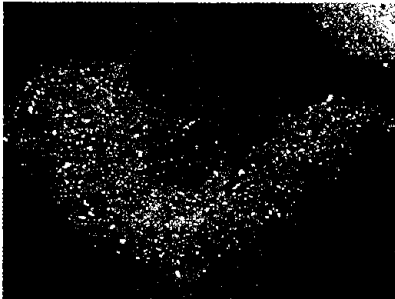
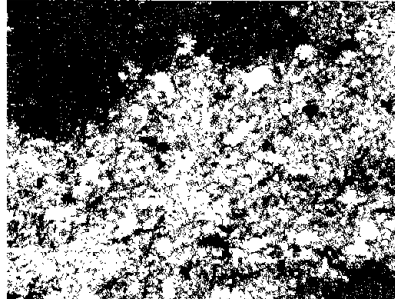
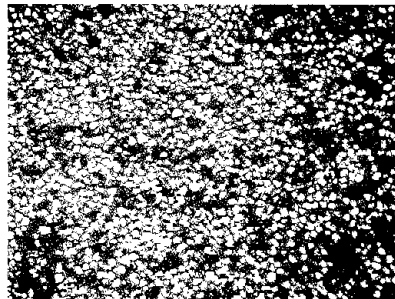
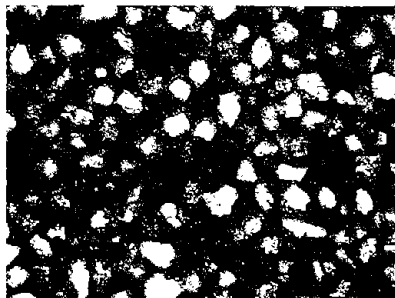
IV.2.2.1. Muestras de canal

Las láminas delgadas de las muestras de canal obtenidas de las pruebas de producción del pozo Lankahuasa-1, fueron fotografiadas (fotografías IV.13.-IV.33.) y se describen a continuación:


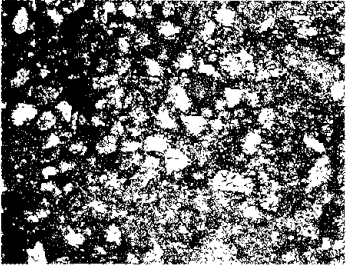
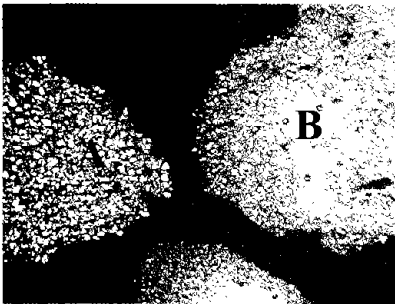
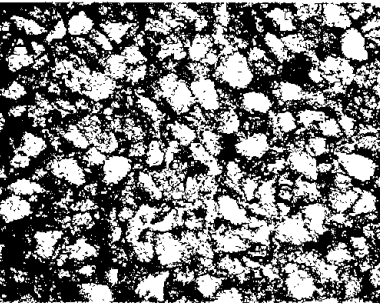
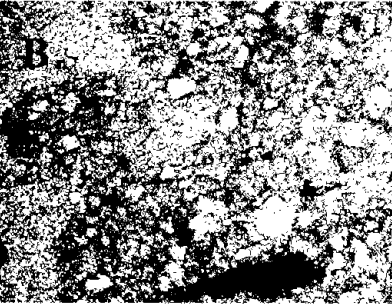
PRUEBA DE PRODUCCIÓN 1 (2652-2664 m)

 <p>25x</p>  <p>200x</p>	<p>Fotografías IV.13. (25x) y IV.14. (200x) Profundidad: 2655 m. Litarenita de grano fino (de 88 a 125 μm), bien seleccionada constituida por fragmentos subangulosos de cuarzo, feldspatos, fragmentos de carbonatos y óxidos; nótese la porosidad intergranular en azul por la impregnación al vacío y sobre-crecimientos de cristales.</p>
 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.15. (25x) y IV.16. (100x) Profundidad: 2660 m. Grauwaca de grano fino (de 88 a 125 μm), constituida por fragmentos subangulosos de cuarzo, feldspatos, óxidos y costras de carbonatos se observa escasa porosidad en pequeñas galerías por la impregnación al vacío .</p>

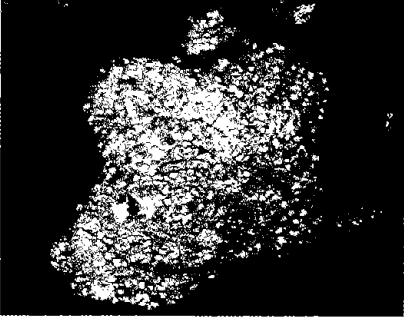
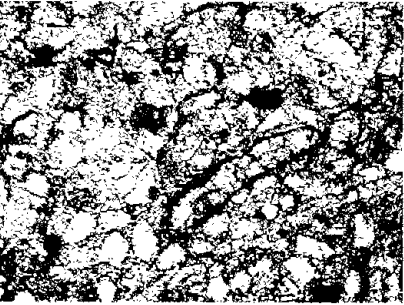
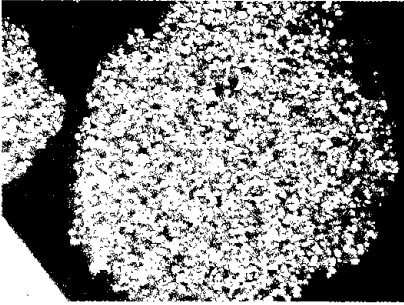
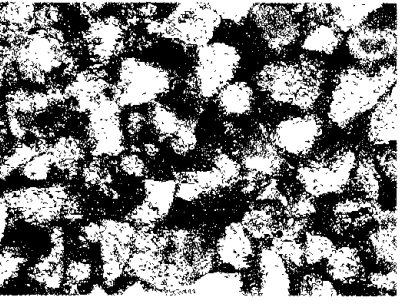
PRUEBA DE PRODUCCIÓN 2 (2573-2592 m)

 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.17. (25x) y IV.18. (100x) Profundidad: 2575 m. Grauwaca de grano fino, mal clasificada, poco compacta, constituida por fragmentos angulosos de cuarzo, feldespatos y óxidos, en una matriz arcillo-calcárea.</p>
 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.19. (25x) y IV.20. (100x) Profundidad: 2580 m. Litarenita de grano fino, bien clasificada, poco compacta, constituida de fragmentos subredondados de cuarzo, feldespato, fragmentos de carbonatos y óxidos; en color azul, se observa porosidad intergranular por la impregnación al vacío, nótese en la ampliación sobre-crecimientos de cristales.</p>

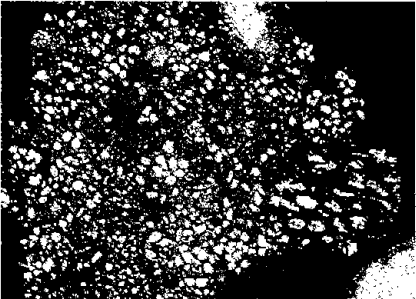
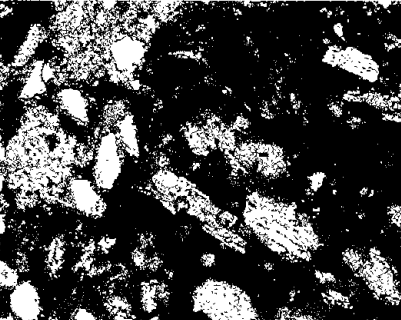
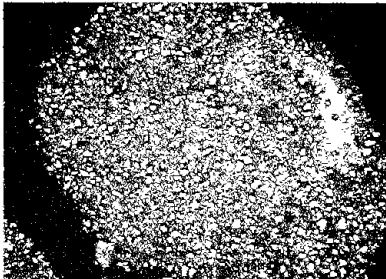
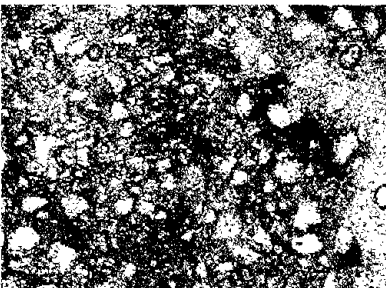
PRUEBA DE PRODUCCIÓN 3 (2470-2480 m)

 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.21. (25x) y IV.22. (100x) Profundidad: 2475 m. Litarenita de grano fino, constituida por fragmentos angulosos de cuarzo, feldespatos y escasos óxidos, moderadamente clasificada, en una matriz calcárea de color gris verdoso; obsérvese en azul la porosidad intercrystalina por la impregnación al vacío.</p>
 <p>25x</p>  <p>100x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.23. (25x), IV.24. (A100x) y IV.25. (B100x) Profundidad: 2480 m. En A, litarenita de grano fino (88 a 125 μm) constituida por fragmentos angulosos de cuarzo, feldespato, escasos óxidos, bien clasificada, se observa porosidad intercrystalina en azul. En B, grauwaca de grano fino con los mismos minerales que A, en una matriz calcárea de color gris verdoso.</p>

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 4 (2428-2439 m)

 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.26. (25x) y IV.27. (100x) Profundidad: 2430 m. Grauwaca de grano fino, constituida por fragmentos subangulosos de cuarzo, feldespato, carbonato y escasos biógenos, óxidos (magnetita); nótese en la ampliación sobrecrecimientos de cristales, cementados en una matriz calcárea.</p>
 <p>25x</p>  <p>200x</p>	<p>Fotografías IV.28. (25x) y IV.29. (200x) Profundidad: 2435 m. Litarenita de grano fino, bien clasificada, constituida por fragmentos subangulosos de cuarzo, feldespato, carbonatos y óxidos; en color azul se observa porosidad intergranular por la impregnación al vacío.</p>

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 5 (2017-2026—2053-2063 m)

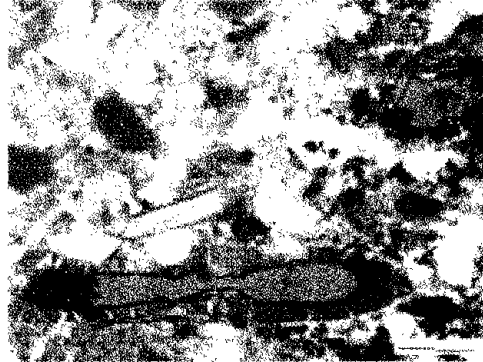
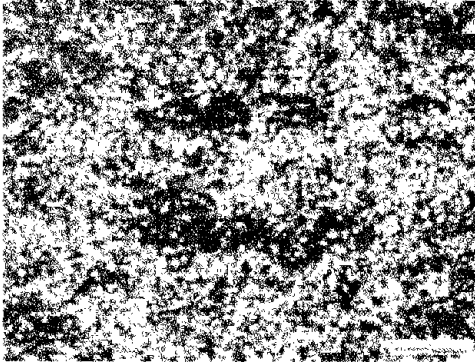
 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.30. (25x) y IV.31. (100x) Profundidad: 2020 m. Litarenita de grano fino, constituida por fragmentos subredondados de cuarzo, clastos de rocas ígneas, de carbonatos, feldespatos sódicos y óxidos, moderadamente clasificada, se observa pobre porosidad intercrystalina en color azul por la impregnación al vacío.</p>
 <p>25x</p>  <p>100x</p>	<p>Fotografías IV.32. (25x) y IV.33. (100x) Profundidad: 2065 m. Grauwaca de grano muy fino, constituida por fragmentos subangulosos de cuarzo, feldespato y óxidos, de regular clasificación, en una matriz de color gris verdoso. No se observa porosidad.</p>

IV.2.2.2. Núcleos

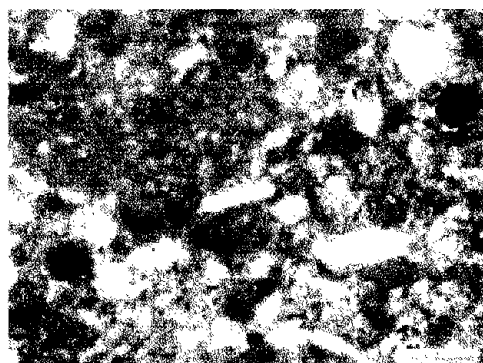
Las láminas delgadas de los núcleos de fondo y de pared del pozo Lankahuasa-1, fueron fotografiadas (fotografías IV.34 – IV.52.) y se describen a continuación.

NÚCLEO DE FONDO 1 (2220-2229 m)

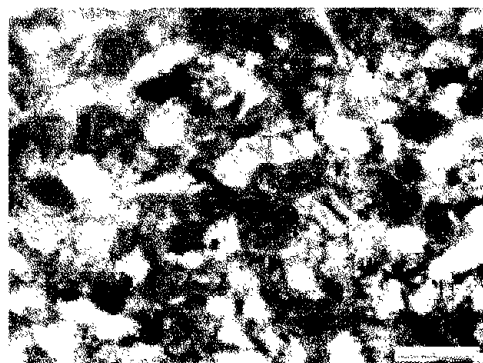
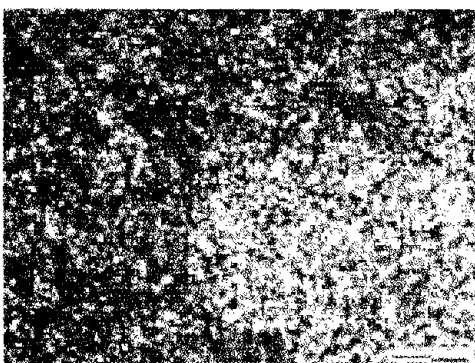
Arenisca arcillosa de color gris claro a gris verdoso, de grano fino, compuesta de fragmentos líticos, cuarzo, feldespato, óxidos y microfósiles, hojuelas de muscovita, biotita y clorita dispersas de subredondeados a redondeados, alta esfericidad y moderada clasificación, en matriz arcillo-calcárea, con abundantes micas y porosidad primaria intergranular e intragranular. (fotografías IV.34.-IV.39.)



Fotografías IV.34. (izq) y IV.35. (der)
Profundidad: 2220.85 m



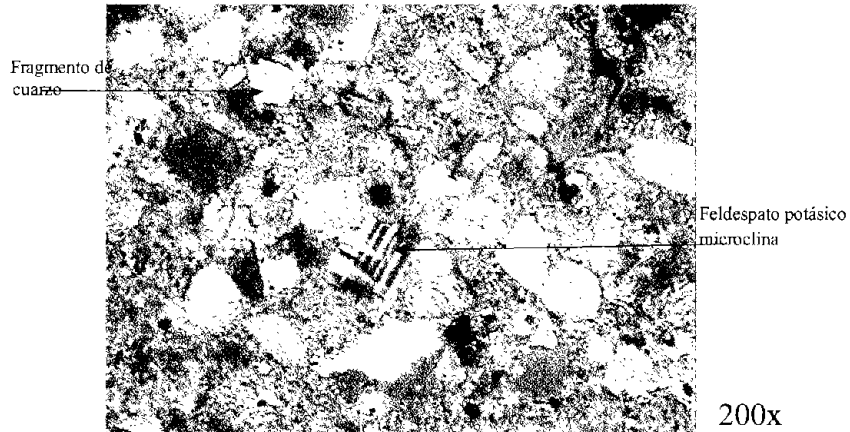
Fotografías IV.36. (izq) y IV.37. (der)
Profundidad: 2221.83 m



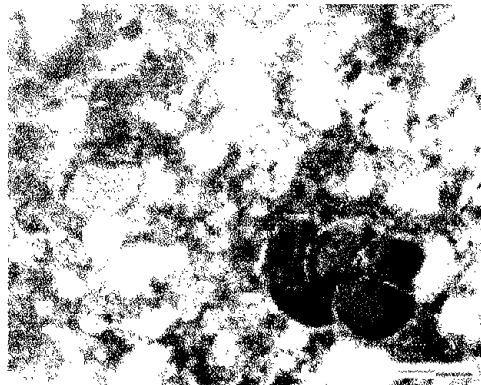
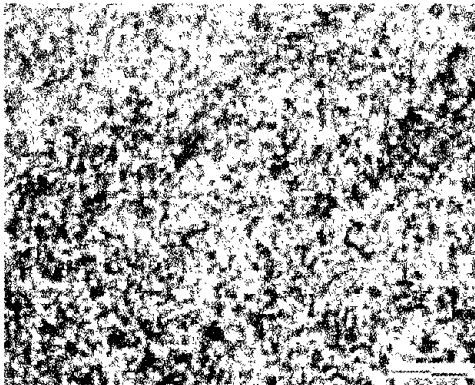
Fotografías IV.38. (izq) y IV.39. (der).
Profundidad: 2226.05 m

NÚCLEO DE FONDO 2 (2478-2487 m)

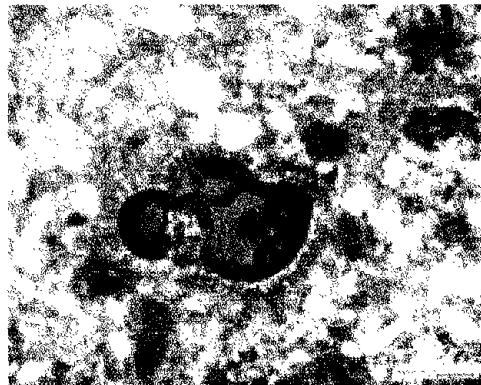
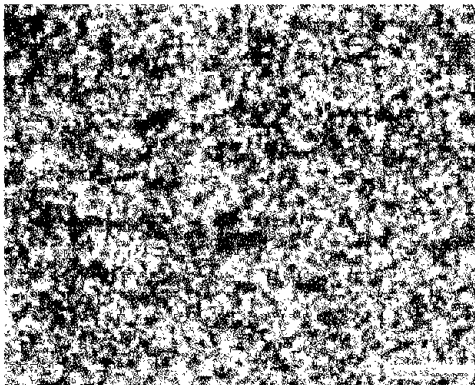
Arenisca arcillosa de color gris claro a gris verdoso, de grano fino compuesta de cuarzo, feldespato, escasos óxidos y predominantemente líticos, subredondeados a redondeados, baja esfericidad, buena clasificación, en matriz arcillo-calcárea, con abundantes micas y porosidad primaria intergranular e intragranular. (fotografías IV.40.-IV.44.)



Fotografías IV.40. Lámina delgada que muestra fragmentos de microclina y cuarzo.



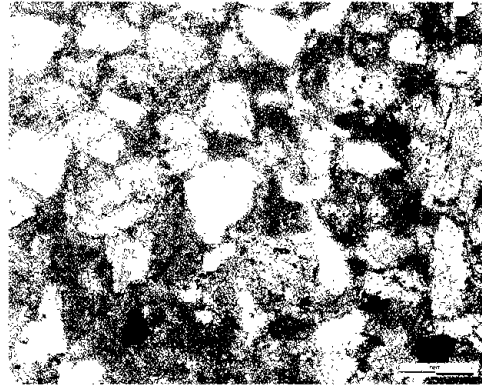
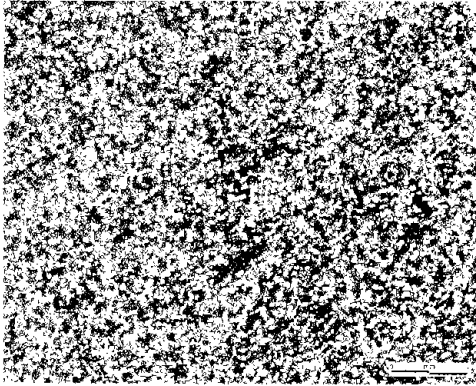
Fotografías IV.41. (izq) y IV.42. (der)
Profundidad: 2478.25 m



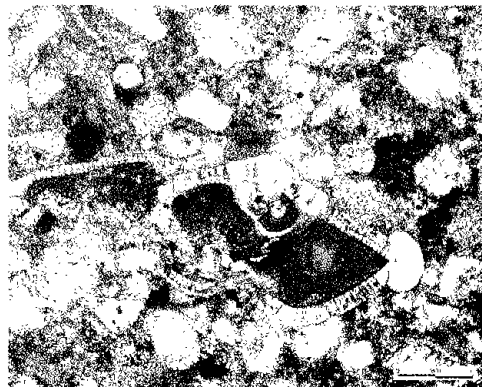
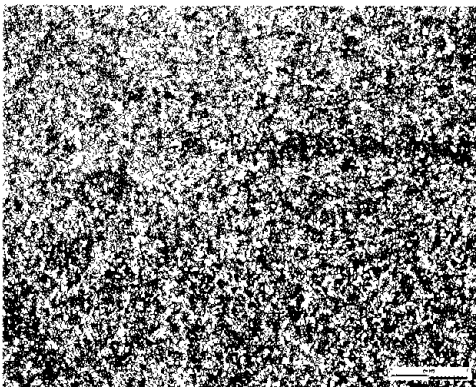
Fotografías IV.43. (izq) y IV.44. (der)
Profundidad: 2485.0 m

NÚCLEO DE FONDO 3 (2625-2634 m)

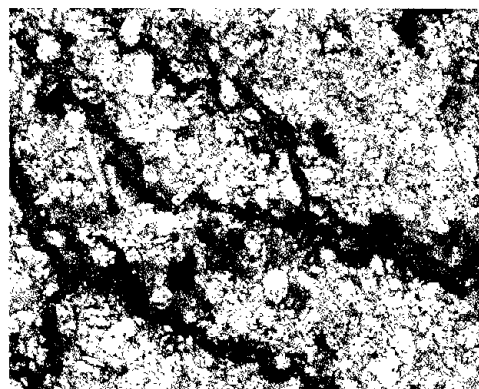
Arenisca arcillosa de color gris claro a gris verdoso, de grano fino, compuesta predominantemente de fragmentos líticos y cuarzo, de subredondeados a redondeados, alta esfericidad y buena clasificación, con cementante calcáreo, con abundantes micas y porosidad primaria (intergranular e intragranular) y secundaria (fracturamiento). (fotografías IV.45.-IV.49.)



Fotografías IV.45. (izq) y IV.46. (der)
Profundidad: 2626.8 m

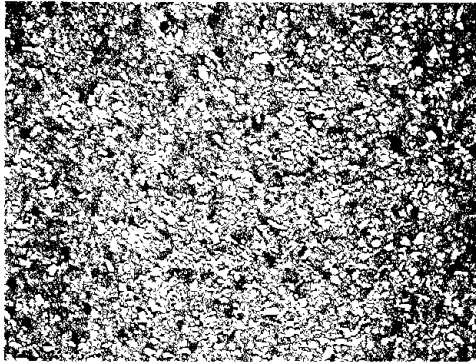


Fotografías IV.47. (izq) y IV.48. (der)
Profundidad: 2630.8 m



Fotografías IV.49. Porosidad en fracturas

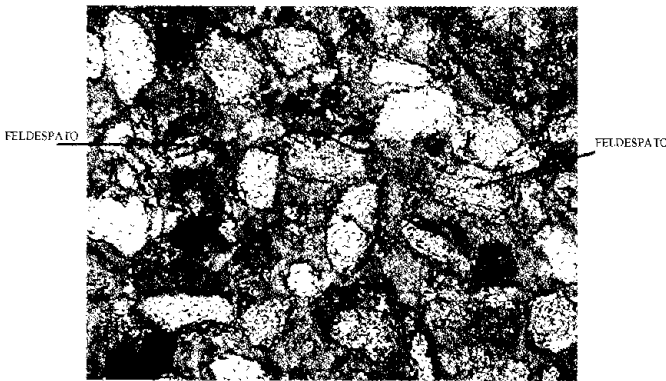
NÚCLEO DE PARED (Profundidad 1476 m)



Fotografía IV.50. (25x)

Litarenita de grano muy fino, bien seleccionada, constituida por fragmentos angulosos de cuarzo y feldespato, también contiene fragmentos calcáreos en forma de granos que se aprecian de color oscuro.

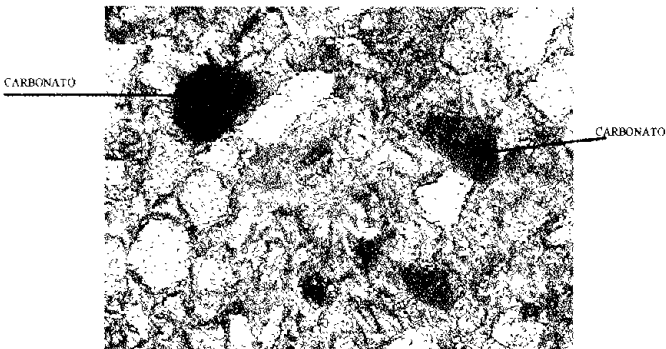
25x



Fotografía IV.51. (200x)

Litarenita de grano fino, constituida por cuarzo, feldespato sódico (con maclas de albita), fragmentos calcáreos y óxidos; en una matriz calcárea.

200x



Fotografía IV.52. (200x)

Litarenita de grano fino constituida por fragmentos subredondados de cuarzo, feldspatos, óxidos y carbonatos.

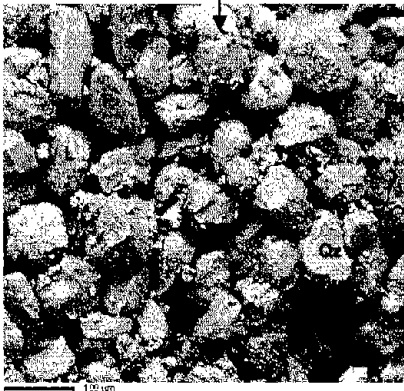
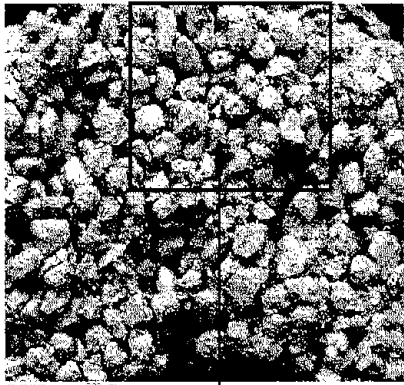
200x

IV.2.3. Microscopio electrónico de barrido (S.E.M.)

Con los objetivos de determinar los tipos de porosidad presentes y su abundancia relativa, documentar la geometría de los poros, determinar las fases mineralógicas que afectan la porosidad y detectar posibles minerales no observados en estudios petrográficos que estén afectando las lecturas de los registros geofísicos y produciendo valores bajos de porosidad efectiva en los intervalos probados y potenciales; se seleccionaron esquirlas de las muestras de canal consideradas representativas de cada profundidad. Entre 3 y 6 esquirlas fueron colocadas en

monturas conductivas y recubiertas con carbono, para los estudios de microscopio electrónico de barrido, donde se utilizó un equipo Zeiss modelo DSM 960A, operando a 25 kV, 54 mA y una distancia de trabajo de 14mm. La microsonda utilizada corresponde a un equipo EDAX modelo DX-4 calibrado con un estándar de cobre, operando a 25 kV, 60 mA, una distancia de trabajo de 27mm y un tiempo de conteo de 100 segundos. (fotografías IV.53.-IV.72.)

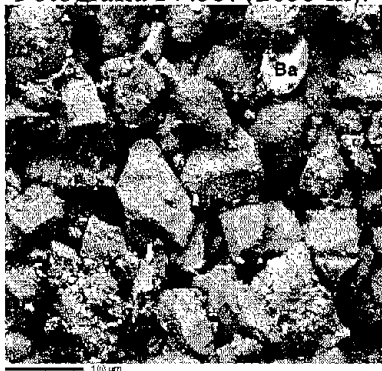
PRUEBA DE PRODUCCIÓN 1 (2652-2664 m)



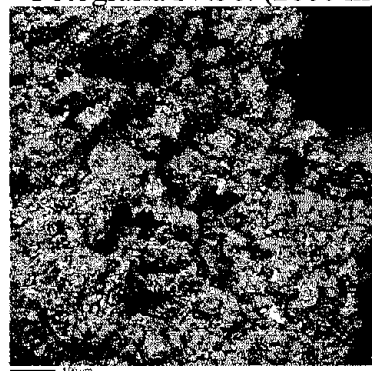
Fotografías IV. 53. (izq) y IV.54. (acercamiento)
Profundidad: 2655 m.

Arenisca de grano fino, compuesta de granos de cuarzo (Qz), fragmentos líticos (L) y feldspatos (F) subangulosos con porosidad intergranular y muy poca matriz. Las partículas pequeñas que se encuentran entre los granos podrían ser en parte residuos sólidos depositados por el lodo de perforación.

Fotografía IV.55. (2655 m).

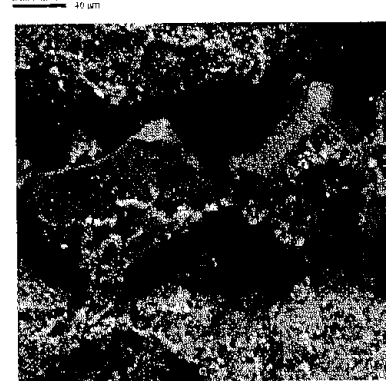
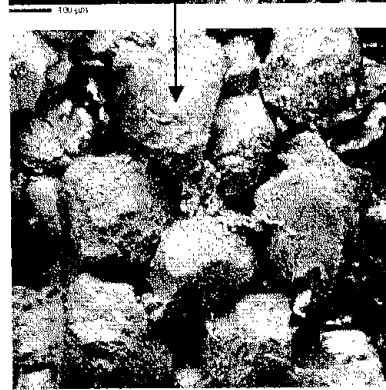


Fotografía IV.56. (2660 m)



Comparación entre una arenisca sin matriz a 2655 m (figura IV.55.) y una arenisca con matriz (grauwaca) a 2660 m (figura IV.56.). En la foto de la izquierda se observa un grano de barita (Ba) del lodo de perforación alojado en un poro.

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 2 (2573-2592 m)



Matriz con cemento de calcita

Sobrecrecimientos sintaxiales de cuarzo

Fotografías IV.57 (izq) y IV.58. (acercamiento)
Profundidad: 2580 m.

Arenisca de granos subredondeados con alta porosidad compuesta principalmente por partículas de cuarzo poco consolidadas. Escaso cemento calcáreo-arcilloso uniendo a las partículas.

Fotografía IV.59. (izq)

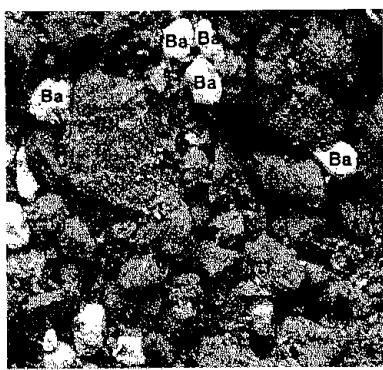
Arenisca con escasa matriz parcialmente cementada por calcita. Se observan sobrecrecimientos de cuarzo sobre un grano del mismo mineral. Obsérvese que el cemento está restringido a las zonas de contacto entre granos y delgados “puentes” entre granos.



Fotografía IV.60. (izq)
Profundidad: 2585 m.

Arenisca con abundante matriz y cemento calcáreo-arcilloso.

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 3 (2470-2480 m)



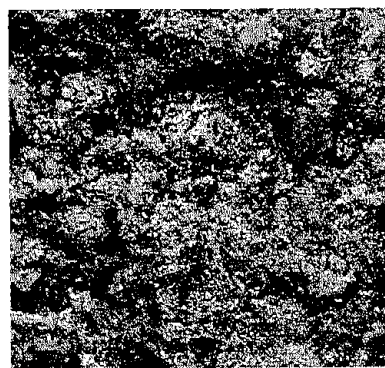
Fotografía IV.61. (izq)

Profundidad: 2470 m.

Partículas de barita (de color blanco) del lodo de perforación alojadas en poros de la roca. Parte del material que se observa como matriz pudiera ser material fino de la misma roca generado por el proceso de perforación así como residuos del mismo lodo de perforación.



a



b



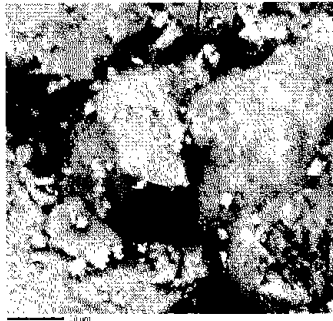
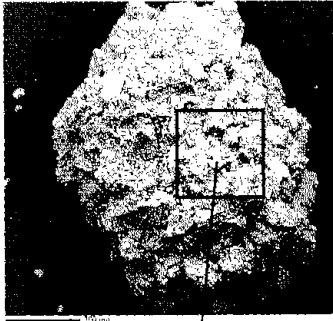
c

Fotografías IV 62. (a), IV. 63. (b), IV.64. (c) (izq)

Profundidad: 2480 m.

Arenisca con abundante matriz (grauwaca) de la parte inferior de la PP-3 y parte superior del núcleo 2. Parte del cemento que circunda los granos se observa en la foto inferior, delineando el hueco dejado por una partícula desprendida.

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 4 (2428-2439 m)



Fotografías IV.65. (izq) y IV.66. (acercamiento)
Profundidad: 2430 m.

Areniscas con abundante matriz (grauwaca) y con porosidad intergranular pobremente interconectada.

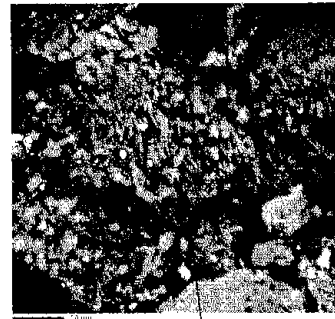
Profundidad: 2435 m

Fotografía IV. 67



Plinta framboidal
dentro de foraminifero

Fotografía IV.69.



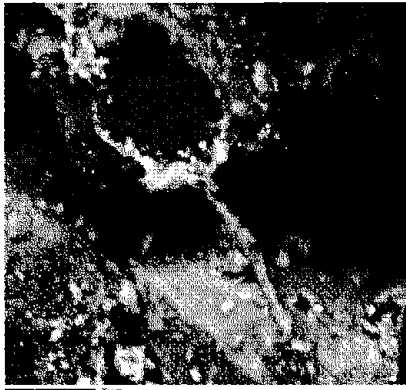
Fragmento de
roca volcánica

Fotografía IV.68.



Calcita ferrosa

PRUEBA DE PRODUCCIÓN 5 (2017-2026—2053-2063 m)

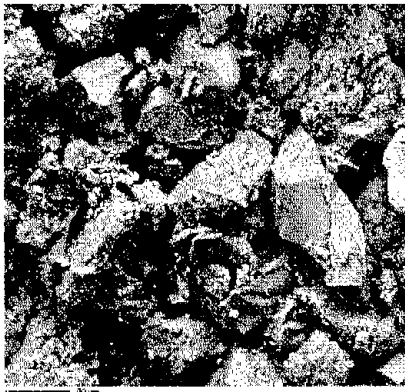


Fotografía IV.70. (izq)
Profundidad: 2020 m.
Cemento calcítico recubriendo parcialmente partículas y formando puentes entre granos.

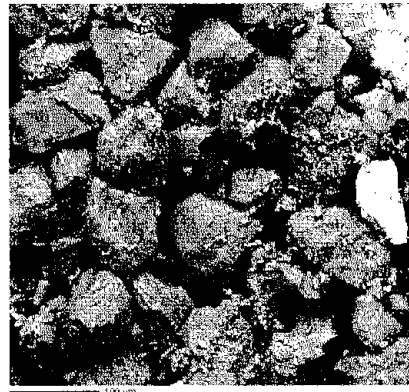
Profundidad: 2055 m.

Aspecto general de arenisca muy fina con partículas angulosas (fotografía IV.71.) y de subangulosas a subredondeadas (fotografía IV.72.), en la que los poros han sido ocluidos por probables sólidos del lodo de perforación o sólidos producidos durante la perforación.

Fotografía IV.71.



Fotografía IV.72.



IV.3. Resultados

TAMAÑO

El tamaño de grano de las muestras obtenidas de las areniscas que cortó el pozo Lankahuasa-1 corresponde, dentro de la tabla de Wentworth, al intervalo de **granos muy finos a finos**, ya que en promedio van de 0.063 mm a 0.083 mm, aunque esporádicamente se pueden encontrar granos más gruesos. Además los granos poseen una **buena clasificación**.

FORMA

Dentro de la forma de los granos, la **esfericidad** de los granos es **alta** en su mayoría; en cuanto a la redondez van **de subredondeados**, más común en todas las muestras de grano muy fino, **a redondeados**, en las areniscas de grano más grueso; esto es entre los valores de 3 y 5 según la clasificación de Folk..

ORIENTACIÓN

Los granos de las areniscas no muestran un arreglo preferencial dentro del depósito.

POROSIDAD

Las muestras indican una **porosidad primaria intergranular** abundante (± 4 a 6%). La microporosidad se encuentra presente principalmente en los minerales de arcilla clástica y autigénica y contribuye de manera moderada con la porosidad total, pero no con la porosidad efectiva. La **porosidad intragranular** también es alta, pero está pobremente interconectada en todas las muestras como para mejorar la calidad de yacimiento en forma significativa.

Un valor promedio de porosidad total es 12%. La figura IV.6 muestra una gráfica relacionando la porosidad de las muestras analizadas con su respectiva profundidad.

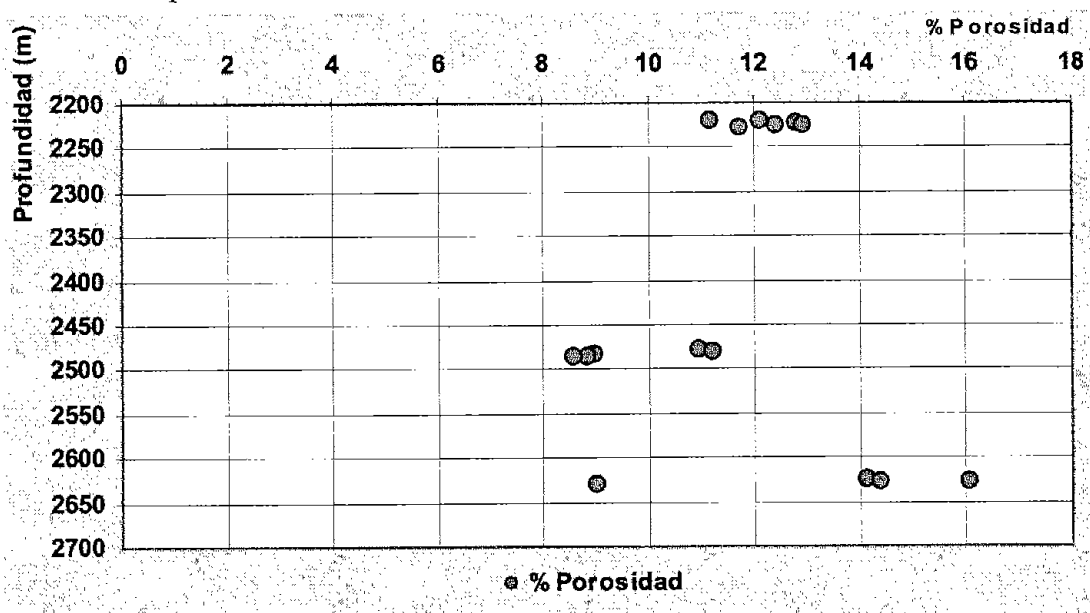


Figura IV.6. Gráfica de porosidad vs. profundidad.

PERMEABILIDAD

La permeabilidad de las muestras analizadas es muy baja (0.09 a 0.77 md). La figura IV.7 muestra la relación entre la permeabilidad y la profundidad de las muestras.

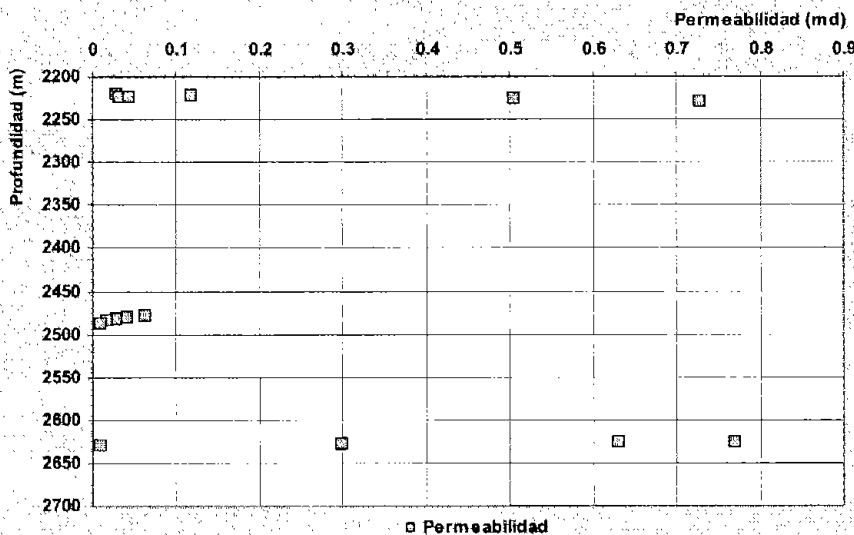


Figura IV.7. Gráfica de permeabilidad vs. profundidad.

MADUREZ TEXTURAL

De acuerdo con la clasificación de madurez textural de Folk, las areniscas caen dentro de los intervalos **maduro** y **supermaduro**, ya que tienen granos bien clasificados de subredondeados a redondeados.

MINERALOGÍA

Los análisis mineralógicos que se determinaron por conteo de puntos y se auxiliaron de los resultados de difracción de rayos X definen que:

Cuarzo. El cuarzo monocristalino es el grano más común en todas las muestras y varían de 14.3-26.7%; los granos de cuarzo policristalino son mucho menos comunes, de 0.3-1.3%

Feldespato. También abundan en las muestras granos de plagioclasa (4.3-8.3%) y feldespato de potasio (1-5%)

Líticos. Los fragmentos de rocas ígneas (10.0-14.7%) consisten en una mezcla de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico; además son mas o menos iguales en abundancia que los fragmentos de rocas calcíticas (8.3-15.3%). Porcentajes menores son representados por líticos metamórficos y siliciclásticos (figura IV.8).

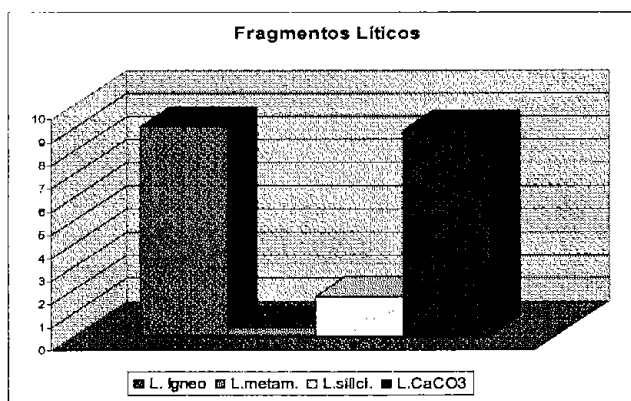


Figura IV.8. Gráfica de composición de los fragmentos líticos.

Minerales arcillosos. Los fragmentos arcillosos se presentan en cantidades menores a moderadas (1.3-6.0% por conteo de puntos) y entre ellos se observan trazas de fragmentos de dolomita, pedernal y fragmentos metamórficos. Los granos reemplazados por calcita-Fe (fragmentos esqueléticos y de caliza en su mayoría) se observan en cantidades menores a moderadas (3.3-10.0% por conteo de puntos). Los análisis de las láminas delgadas y del núcleo indican que la matriz típicamente se introdujo por bioturbación, aún cuando parte del material puede ser de origen depositacional primario (laminaciones de arcilla). Consiste principalmente de arcillas clásticas recristalizadas e incluyen illita-esmectita en capa mixta (exhibe una morfología de trenzada a fibrosa), illita, kaolinita (asociada a granos de glauconita alterada) y clorita. Otros constituyentes de matriz incluyen partículas de feldespato y cuarzo tamaño arcilla (aparición de escamosa a ondulada), materia orgánica y partículas de carbonato tamaño arcilla. El análisis de rayos X (DRX) detectó illita en todas las muestras, pero la illita discreta no se detectó en los análisis de SEM y de lámina delgada. Esto sugiere que la mayoría de lo que detectó DRX como illita es en realidad mica y/o granos de glauconita

Minerales accesorios. Los granos accesorios se presentan en cantidades traza a menores e incluyen micas, minerales pesados, foraminíferos, fragmentos fósiles indeterminados, fragmentos orgánicos (plantas) y glauconita. Los foraminíferos (primariamente planctónicos) nunca son comunes en las muestras, pero son muy notables, típicamente asociados con porosidad intraesquelética. Los granos de glauconita se observan en todas las muestras.

PROCEDENCIA

Con la intención de determinar la procedencia de las areniscas, se realizaron estudios a los cuatro núcleos de pared y a diferentes profundidades dentro de los núcleos de fondo. En total se analizaron 20 muestras, cuyos resultados se enlistan en la tabla IV.3. y muestran en la figura IV.9.

PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA	CUARZO	FELDESPATO	LÍTICOS
1382	0.3	0.1	0.6
1476	0.4	0.1	0.5
1586	0.3	0.1	0.6
1683	0.3	0.1	0.6
2220.85	0.3	0.1	0.6
2221.83	0.2	0.1	0.6
2223.6	0.3	0.1	0.6
2224.8	0.2	0.1	0.7
2226.05	0.3	0.1	0.6
2228.6	0.3	0.1	0.6
2478.25	0.3	0.1	0.6
2480.86	0.3	0.1	0.5
2482.95	0.3	0.1	0.6
2485	0.4	0.1	0.5
2486.98	0.3	0.1	0.6
2625.54	0.3	0.1	0.6
2626.8	0.3	0.1	0.6
2628.4	0.3	0.1	0.6
2630.8	0.3	0.1	0.6
2634.3	0.3	0.1	0.6

Tabla IV.3. Composición de las areniscas.

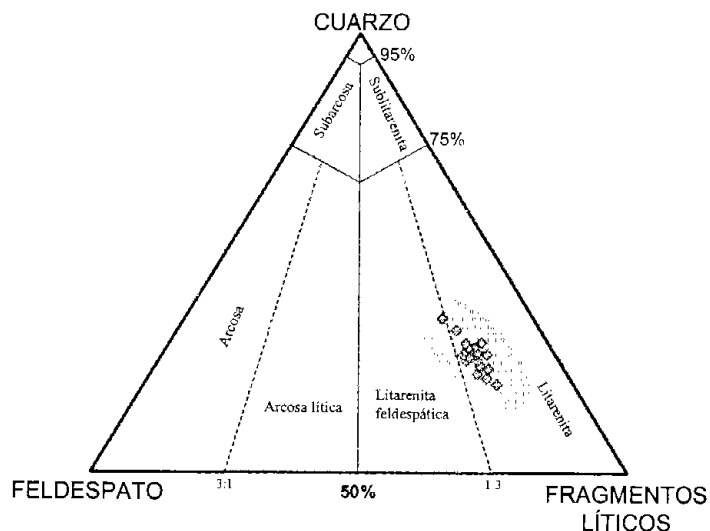


Figura IV.9. Diagrama ternario para la composición de las areniscas.

De acuerdo con el cuadro de Dickinson, los resultados de los análisis de las muestras indican una procedencia de un orógeno reciclado.

DIAGÉNESIS

Una secuencia de los eventos diagenéticos, su cronología relativa y su duración se presentan en la figura IV.10. Los eventos diagenéticos mecánicos han alterado en gran medida las texturas y composiciones de las muestras. Los principales agentes de reducción de espacio poroso y controladores importantes de la calidad del yacimiento, son la compactación mecánica y la diagénesis química, principalmente los carbonatados..

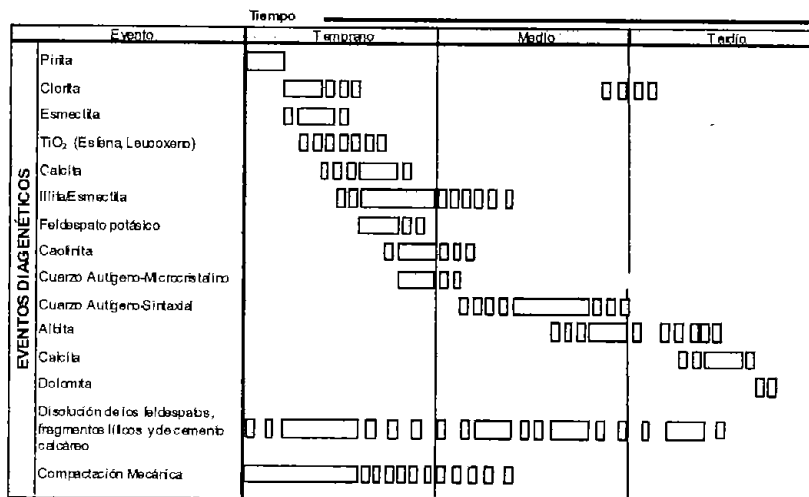


Figura IV.10. Secuencia de eventos diagenéticos.

V. AMBIENTE SEDIMENTARIO

V.1. Marco teórico

CONCEPTO DE FACIES

El primer uso del término “facies” es atribuido a Amans Gressley en 1838. Él fue un geólogo suizo que aplicó el término a cambios laterales que él observaba dentro de las unidades estratigráficas del Mesozoico. Ahora, el término ha sido ampliado para incluir las características litológicas (tamaño, forma, color y estructura de los granos y tipo de estratificación) y biológicas (fósiles) de una unidad estratigráfica.

En la actualidad se habla de “facies de arrecife”, “facies deltaica”, etc., en otras palabras, cada ambiente, sin importar su amplitud o límites, es caracterizado por su propia facies. Las características y los límites de un ambiente sedimentario moderno pueden establecerse usando parámetros sedimentarios, atributos biológicos y estructuras sedimentarias. También pueden utilizarse la topografía, el tirante de agua y los procesos físicos. Por el contrario, las rocas tienen atributos preservados, como la petrología, paleontología, estructuras sedimentarias y geometría, que los geólogos pueden usar para la definición de la facies.

LEY DE WALTHER

Probablemente el concepto más importante aplicado por sedimentólogos y estratígrafos, fue formulado por Johannes Walther en 1894. Él enunció: “solo pueden sobreponerse aquellas facies y/o conjunto de facies que se encuentren juntas en la actualidad”. También llamada la ley de la correlación (o sucesión) de facies. El punto principal es la relación entre la distribución lateral de las facies sedimentarias modernas y la sucesión vertical de las facies en el registro rocoso. Estudios detallados de la amplia gama de ambientes modernos y los registros estratigráficos, han mostrado que hay un número limitado de asociaciones litológicas, estructuras, fósiles, etc. Y como resultado de esto, existe un número de modelos depositacionales modernos, que caracterizan varios ambientes sedimentarios. Pero si se determina que la reconstrucción de los ambientes de una sección vertical en particular no es lógica, hay dos posibles explicaciones: el o los ambientes depositacionales han sido mal interpretados o está presente una discordancia.

RELACIÓN ENTRE LOS AMBIENTES DEPOSITACIONALES Y SUS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

La génesis de unidades litocstratigráficas y sus diversos componentes tiene un principal interés para los geólogos preocupados por la interpretación de los ambientes sedimentarios antiguos. Hay una obvia relación entre las características de un ambiente sedimentario dado y los materiales que se acumularon allí. Algunos ambientes colindantes muestran condiciones y sedimentos totalmente contrastantes o, por el contrario, muy parecidos; de tal manera que las rocas producidas por tales ambientes pueden ser similares o notablemente diferentes. Estos problemas potenciales demuestran la importancia que tiene el conocimiento de los ambientes sedimentarios modernos para el trabajo de los geólogos en la interpretación de ambientes antiguos.

Los ambientes de depósito, es decir, donde tiene lugar la acumulación de los sedimentos, es de tipo continental o marino. Debido al propósito de la presente tesis, se analizarán fundamentalmente los ambientes de carácter marino.

AMBIENTE DE DEPÓSITO MARINO Y PLATAFORMA CONTINENTAL

El ambiente marino es comúnmente subdividido, de acuerdo con la profundidad del agua, en zonas costera, nerítica, batial y abisal; la extensión superficial de estas zonas y sus relaciones con la costa, dependen de la geometría de la cuenca, incluyendo su tamaño y forma y las irregularidades de su margen y piso.

En ocasiones se suele mencionar al “ambiente transicional”, como el ambiente intermedio entre el marino y el continental, dentro del cual, se distinguen dos tipos de mares someros: los *epeiricos* o *epicontinentales*, situados en áreas continentales inundadas con un tirante de agua pequeño a modo de pasadizos o brazos de mar que, a veces, están parcialmente confinados por áreas terrestres; y los *marginales* o *pericontinentales*, que son los de las plataformas continentales clásicas que rodean a los continentes, extendiéndose hasta el talud.

La plataforma continental es una parte del fondo marino que se extiende desde la costa hasta el cambio de pendiente que da paso al talud continental. En la práctica, los límites son variables, pues hacia la costa se toma el nivel de base del oleaje de buen tiempo que varía con la energía de la costa y la estación del año y, hacia el océano, el cambio de pendiente se produce a profundidades distintas (por término medio a unos 200 metros, Jonson y Baldwin, 1986) y no se sitúa a una distancia fija de la costa.

La plataforma se ha dividido en dos zonas o facies principales, que reciben diferentes nomenclaturas por diversos autores. La de mayor aceptación a nivel mundial, señala a la *plataforma interna* como la zona hacia la línea de costa y *plataforma externa* a la zona hacia mar abierto. Se considera que la plataforma interna está caracterizada por sedimentos arenosos, y que en la plataforma externa predominan los sedimentos lodosos.

Los sedimentos de la plataforma provienen de diferentes fuentes. Se han reconocido seis tipos principales de sedimentos de plataforma:

- Clásticos; sedimentos que provienen de las zonas continentales y son suministrados a la plataforma,
- Biogénicos; conchas fragmentadas, pellets fecales, etc.,
- Residuales; intemperismo de afloramientos de rocas,
- Autigénicos; glauconita, fosforita, etc.,
- Volcánicos
- Relictos; remanentes sedimentarios de un ambiente anterior y ahora en desequilibrio.

Las arenas de las plataformas terrígenas han sido de gran importancia en la exploración de hidrocarburos. Éstas comúnmente tienen buena porosidad y permeabilidad y se encuentran muy cercanas a rocas generadoras potenciales, con alto contenido orgánico.

La morfología del fondo y las características sedimentarias son muy variables: el fondo puede ser llano o mostrar una topografía irregular con bajíos o islas, que pueden alcanzar tamaños respetables, desde *rizaduras* de oscilación hasta olas de arena (sand waves) movidas por oleaje o corrientes marinas; o bien, pueden aparecer rasgos erosivos y valles fluviales en épocas de nivel del mar más bajo. La granulometría del sedimento puede variar de unos puntos a otros.

Actualmente las plataformas tienen una compleja evolución depositacional y erosiva que es dominada por el rápido incremento del nivel del mar del Holoceno Temprano, mayor a los 100m, debido a éste, las plataformas no siempre están en equilibrio con los procesos internos existentes.

Un aspecto esencial del estudio de sedimentos de plataformas es la comparación con los análogos actuales. Originalmente se pensaba que el depósito se llevaba a cabo por asentamiento de las partículas en aguas tranquilas y que la granulometría disminuía gradualmente hacia el mar abierto. Luego se cayó en la cuenta de que los cambios eustáticos han provocado la acumulación de sedimentos bajo condiciones más energéticas. Aún no se cuenta con un conocimiento detallado y extenso, pero se sabe que no todo el sedimento es heredado y que en las plataformas actúan procesos semejantes a los deducibles del pasado.

FACTORES QUE CONTROLAN LA SEDIMENTACIÓN EN LA PLATAFORMA

Los sedimentos de mares someros se presentan en todas las épocas geológicas alrededor de todo el mundo y comparados con los sedimentos de zonas litorales, los de plataforma conforman espesores más grandes. Por ejemplo, sedimentos con alrededor de 6 000m fueron depositados en plataformas del Golfo de México durante el Terciario Tardío y Cuaternario.

El aporte de sedimento en la superficie, es comúnmente un factor limitante para el volumen del sistema. El sedimento de plataforma en tanto autóctono, como alóctono. El material autóctono es internamente derivado de la erosión de depósitos de diferentes áreas del piso de plataforma, erosión de la costa durante una transgresión y de precipitación biogénica o química in situ. El sedimento alóctono es importado a la plataforma por flujos generados por: tormentas (arena), marea (lodo y arena), frentes de delta (arena muy fina y lodo) y ligeras desembocaduras costeras (arena fina y lodo).

Los sedimentos de plataforma, probablemente constituyen el grupo más importante de las rocas sedimentarias, pero varían significativamente de localidad en localidad por factores físicos, químicos y biológicos importantes que controlan o influyen patrones composicionales y texturales de las plataformas.

○ Factores físicos:

- Fluctuaciones en el transporte de sedimento; o sea, marcadas diferencias en la entrada de material terrígeno de áreas circundantes, debido a la presencia o ausencia de grandes deltas; el tamaño, naturaleza y clima de las áreas fuente relevantes a la localización de estudio, etc.
- Topografía del piso marino
- Retrabajo de sedimentos
- Subsidencia y cambios relativos en el nivel del mar. Estas fluctuaciones influyen en características como: la energía hidráulica en el fondo del mar, la anchura de la plataforma, la posición de la desembocadura de los ríos que suministran los sedimentos, el espesor de las capas, etc. Se pueden presentar tres casos diferentes:
 - Si la subsidencia es igual a la tasa de sedimentación por un cierto período, la facies de cada localidad se mantiene sin cambio. Por tanto, cada facies particularmente puede, en teoría, lograr un espesor bastante grande.
 - Si el fondo marino subsidencia más rápido que la acumulación de sedimento, la profundidad del agua incrementa y las diferentes zonas de facies migran hacia el

continente. Resultados similares son atribuidos a una rápida elevación del nivel del mar.

- Un levantamiento tectónico del fondo marino o una caída en el nivel del mar causa una migración mar adentro de las zonas de facies.

▪ Regímenes hidráulicos diferentes. Por su importancia en la sedimentación, existen cinco tipos de corrientes, aunque cabe añadir las olas de origen sísmico o tsunamis, que barren las plataformas y las costas vecinas de las regiones sísmicamente activas. Las corrientes están relacionadas entre sí y según las condiciones geográficas y climáticas, alguna de ellas tiende a dominar sobre las restantes, lo que es de vital importancia para clasificar las plataformas lo que provoca que la distribución del sedimento sea diferente para cada dominio. Los regímenes hidráulicos de las plataformas continentales se clasifican en:

- Corrientes oceánicas o semipermanentes :

Comprenden a todas aquellas corrientes marinas de circulación global y se deben a las diferencias de temperatura entre las masas de agua y aire situadas en el Ecuador y en los Polos, que producen un flujo térmico del Ecuador hacia los Polos. Estas corrientes establecen un patrón generalizado de transporte de sedimentos, soportado y/o modificado por las otras corrientes. Las corrientes oceánicas se mueven con velocidades variables, de unos cuantos centímetros por segundo a más de 250 cm/s. Las corrientes de baja energía transportan sedimentos en suspensión y las de mayor energía en forma de ondulaciones de arena o “sand waves”. De acuerdo con la profundidad a que se extienda el movimiento del agua, pueden afectar el fondo de las plataformas en grandes extensiones. Si las masas de agua contienen poco oxígeno a determinada profundidad, se pueden producir episodios anóxicos en los fondos afectados, lo que tiene interés desde el punto de vista económico por la acumulación anormal de materia orgánica y la fijación de minerales.

- Corrientes de oleaje

Estas corrientes, junto con las de mareas, operan día con día sobre el piso marino y presentan patrones de transporte y depósito bien establecidos. Son el producto de un movimiento orbital de agua asociado con movimientos de olas en la superficie. Los sedimentos transportados sobre las plataformas están significativamente influidos por la interacción de olas y corrientes unidireccionales producidas en condiciones someras.

- Corrientes meteorológicas o de tormenta

Están gobernadas por factores meteorológicos mas o menos locales, los cambios de presión barométrica y en especial los vientos diurnos y las tempestades, que apilan agua sobre la costa y producen una sobreelevación del nivel del mar. Este tipo de corriente suele ser de periodicidad diurna, o mayor en contraste con las mareas astronómicas. La sobreelevación del nivel durante los temporales es uno de los factores que desencadenan la erosión de las playas y la formación de corrientes de resaca de tormenta (*store surge ebb*). Las corrientes meteorológicas

o de tormenta son procesos catastróficos y no presentan patrones fijos, por lo que la distribución de los sedimentos es impredecible, además constituyen normalmente las únicas condiciones de alta energía en las plataformas abiertas, donde la influencia de las mareas es despreciable. Dependiendo del tipo de evento meteorológico de que se trate, sus velocidades varían de 25 a 80 cm/s. Pueden desplazar grandes volúmenes de sedimentos de diversos tamaños en un corto período.

- **Corrientes de marea**

Las mareas son deformaciones de las masas de agua que cubren la tierra en respuesta a la atracción combinada de la Luna y el Sol. La magnitud de esa deformación es lo que se llama amplitud de marea y es función del período de oscilación de la cuenca, que está determinado por sus dimensiones (tamaño y profundidad). Las mareas se forman en los océanos y se propagan hacia sus bordes como unas olas u ondas que están sujetas a las fuerzas de Coriolis. Las corrientes de marea mueven el sedimento de tamaño de arena y son capaces de acumularlo en barras arenosas. Las corrientes inducidas por el flujo y el reflujo suelen seguir caminos diferentes y la desigualdad de las corrientes residuales que pasan sobre la cresta de la barra van modificando su forma, haciéndola más y más sinuosa hasta romperla. Las corrientes mareales suelen tener un papel secundario en las plataformas abiertas, pero son muy activas en zonas con restricciones topográficas.

- **Corrientes de densidad**

Se deben a diferencias de temperatura, salinidad y/o concentración de sedimento en suspensión y aparecen como capas de agua en movimiento a distintas profundidades, como ocurre en las desembocaduras de los ríos y en los estuarios.

- **Factores químicos:**

Los procesos químicos revisten gran interés y de su estudio se pueden dar muchas conclusiones sobre la génesis de los depósitos de plataforma. Entre los más interesantes destaca la génesis de minerales autigénicos, es decir formados en el propio ambiente y que pueden usarse por ello para identificarlo. En fondos con escasa sedimentación terrígena se forma chamosita, en aguas cálidas, de entre 10 y 170 metros de profundidad; glauconita en aguas más frías, de entre 10 y 200 metros de profundidad; siderita en aguas algo más cálidas que las requeridas por la glauconita y fosforita en zonas de corrientes marinas ascendentes (upwelling) cuyas aguas cargadas en nutrientes favorecen la multiplicación del fitoplancton.

Los marcos en los cuales se presentan característicamente las arenas micáceas son: pendientes externas de deltas, plataformas externas, abanicos y canales submarinos.

Algunos otros procesos que tienen lugar son: la precipitación de carbonatos, de sílice, de hidróxidos de hierro, de manganeso, entre otros, gobernados por las variaciones en el pH, Eh, salinidad, temperatura del agua, etc.

○ Factores biológicos:

Éstos se refieren a las variaciones en la producción biogénica, o sea, la calidad, cantidad y grado de conservación de la materia orgánica dentro de los sedimentos. El vestigio de procesos biológicos en los sedimentos de plataforma es inversamente proporcional al rango de transporte. La bioturbación prevalece en áreas de lenta sedimentación de grano fino; por ejemplo, el norte de la plataforma del Golfo de México. La mayor población de invertebrados es comúnmente encontrada justo en la transición entre la plataforma interna y la costa; además la actividad bentónica está fuertemente influida por la química del agua basal.

Los organismos marinos tienen un efecto importante en la tasa de sedimentación de algunas plataformas arcillosas. Muchos sedimentos finos suspendidos son concentrados como pellets fecales, los cuales se sedimentan más rápido. Si bien estos pellets tienden a desintegrarse o compactarse hasta volverse irreconocibles, algunos se mantienen intactos y se comportan hidrodinámicamente como granos de arena. La glauconita y la chamosita son alteraciones diagenéticas comunes producidas a partir de pellets fecales.

Las plataformas que tienen lodos bioturbados o con pellets, comúnmente bajo aguas oxidantes, contrastan con las que tienen los lodos orgánicamente ricos, los cuales se encuentran bajo aguas anóxicas. Un alto valor en la productividad orgánica de las aguas, provee grandes cantidades de materia orgánica al fondo marino, lo que ocasiona la declinación del oxígeno en la capa de agua basal. Las altas concentraciones orgánicas en el sustrato, con valores de carbón orgánico de 20% o más, son precursores ideales de kerógenos.

CLASIFICACIÓN DE LAS PLATAFORMAS

En la actualidad existe una gran variedad de métodos para clasificar de las plataformas continentales. Cada una de las clasificaciones está basada en el factor, que al parecer de su propio autor, juega el papel principal dentro de las plataformas.

Según su tectónica y clima, Shepard (1977) divide a las plataformas continentales actuales en seis categorías principales:

○ Plataformas glaciales

En altas latitudes, los glaciares se extienden desde las masas continentales hacia la plataforma continental formando rasgos y depósitos distintivos, inclusive llegan a erosionar directamente el sustrato y los sedimentos de la plataforma, creando canales de agua de fusión que posteriormente son rellenados de sedimentos, al fundirse la masa de hielo.

○ Plataformas con cordilleras o montículos de arena

Es muy frecuente que la parte interna de las plataformas presenten barras de arena. Las barras están asociadas a *rizaduras* y *megarizaduras*. El estudio de estas barras pone de manifiesto su complejo origen y se diferencian al menos tres mecanismos distintos: unas se forman en la parte baja de la zona de rompiente (shoreface) y quedan aisladas al progresar la transgresión sufriendo posteriormente el retrabajo de plataforma; otras se forman a partir de acumulaciones de arena o barras en las desembocaduras de estuarios y canales de marea cuando quedan sumergidos; otras se inician a partir de las barras arenosas con forma de martillo que se acumulan en los cabos donde confluyen derivas

litorales. Una vez sumergidas, las futuras barras sufren un retrabajo superficial de intensidad variable por los agentes de la plataforma, en particular el oleaje y las corrientes.

○ Plataformas de grandes deltas

Sedimentos suministrados por grandes ríos producen un gran cuerpo de sedimento que regularmente prograda sobre la plataforma, por lo que ésta reduce su dimensión. En ocasiones la plataforma interna no existe y la plataforma externa está constituida casi exclusivamente de sedimentos lodosos debido a que el sedimento más grueso es depositado en el delta.

○ Plataformas con arrecifes de coral

Los arrecifes y bancos de carbonato constituyen zonas elevadas en la plataforma que son colonizadas por organismos en las zonas tropicales y que están rodeadas de abanicos de sedimento carbonatado de origen orgánico que forman taludes alrededor de los altos.

Se sitúan en el margen de la plataforma con morfología alargada irregular y los taludes los conectan el talud continental, o bien forman pináculos y bajíos de morfología y modo de agruparse irregulares, generalmente controlados por la tectónica.

○ Plataformas bordeadas por islas o bancos rocosos

Las islas y bajíos rocosos pueden darse en plataformas amplias o estrechas, primordialmente en el margen exterior. Estos altos topográficos provocan que el sedimento derivado de la zona continental sea atrapado en la zona de plataforma y los surcos que los separan pueden estar más o menos cubiertos de sedimento fino.

○ Plataformas relacionadas con placas tectónicas

La anchura de la plataforma generalmente es la característica más prominente que puede ser relacionada con la tectónica de placas. Plataformas estrechas usualmente son encontradas en márgenes activos, como a lo largo de la costa del Pacífico, mientras que plataformas amplias son típicas de márgenes pasivos, como en el Golfo de México y el Océano Atlántico.

La clasificación más aceptada por la comunidad geológica actual es la que desarrolló Reading (1986) y que retomada por Galloway y Hodbay (1996), en la que distingue a las plataformas siliciclásticas de acuerdo a la predominancia de los procesos hidráulicos que originan la acumulación de sedimentos; esto lo hace con la ayuda de un espectro de regímenes hidráulicos en diferentes condiciones geográficas (figura V.1.). La clasificación toma los puntos límites del espectro que se muestra, los cuales son:

Los sistemas de plataforma “dominados por las olas”, son caracterizados por gradientes texturales finos hacia el mar, que pueden estar localmente complicados por elevaciones de bajo relieve, láminas y bancos irregulares. Las sucesiones sedimentarias comúnmente aumentan el tamaño de grano hacia la cima, dominando la arena fina y el lodo.

El noroeste del Golfo de México es una plataforma dominada por el oleaje, aunque ocasionalmente intervenida por tormentas.

Los sistemas de plataforma “dominados por tormentas”, son distinguidos por el retrabajo de las capas de turbidez dentro de cordilleras y arreglos complejos de bancos de arena. El producto básico depositado, la capa de “tormentitas”, es ampliamente identificada y

reconocida en sistemas de plataforma antiguos y modernos y representa el bloque principal construido dentro del sistema de plataforma.

Las secciones consisten de amalgamamientos de pequeñas elevaciones con estratificación cruzada y hummocky, de arena muy fina a fina (en algunos casos de media a gruesa). Las arenas y ocasionalmente las gravas, forman lentes que pueden estar aislados o en contacto, dentro de laminaciones de granos más finos originados de diferentes fuentes de aporte. Las capas gradadas emplazadas debajo de la zona de intenso oleaje tienen espesores de unos cuantos centímetros a decímetros. Las estructuras internas incluyen rizaduras y laminación horizontal. Las cubiertas lodosas son comunes y las capas pueden estar bioturbadas, particularmente en la cima. También pueden presentarse marcas de objetos (tool marks) e impresiones de conchas.

Durante las tormentas, los cambios barométricos generan el descenso de las corrientes marinas, donde las corrientes fluyen de mar abierto hacia la línea de costa, lo que provoca un transporte de sedimento en sentido contrario a las condiciones climáticas normales. La distribución de facies sedimentarias está controlada principalmente por: la dirección de las tormentas estacionales (la cual es impredecible), la descarga de los ríos, el tipo de sedimento suministrado, la topografía del fondo marino. Existen dos zonas preferenciales de sedimentación arenosa, asociadas a los cambios topográficos más importantes de la plataforma, la primera zona se localiza en el cambio topográfico entre el talud continental y la propia plataforma y la segunda zona se ubica sobre la línea de costa. En mayor o menor grado cualquier régimen de plataforma puede ser afectado por procesos de tormentas.

Los sistemas de plataforma “dominados por corrientes oceánicas y mareas”, son característicamente estrechos, son afectados diariamente por la fuerza de las corrientes de fondo permitiendo una amplia gama de macroformas en capas o barras. Las facies de arena y grava son componentes prominentes y ocurren en lentes aislados y láminas corrugadas. Pueden presentarse rizaduras laminados, superficies erosionadas y consolidadas. La distribución de facies en ambientes recientes, sugiere que la dispersión de los sedimentos y de patrones de estructuras, son paralelos a las corrientes de marea. Estas corrientes son principalmente perpendiculares a la línea de costa y los patrones son afectados por condiciones locales tales como:

- La fisiografía de la cuenca
- Rugosidad del fondo
- Tipo de sedimento disponible
- Exposición a las olas de tormenta

Las principales rutas de transporte cubren cientos de kilómetros de longitud y muchas de ellas divergen o convergen y cuando lo hacen, forman montículos arenosos que por sí solos constituyen una facies sedimentaria.

Muchos sistemas de plataforma ilustran tipos intermedios, reflejando la influencia de dos o más procesos en la formación de sus facies. Debido a las condiciones hidráulicas, las plataformas dominadas por mareas y las dominadas por tormentas presentan la mayor diversidad de facies sedimentarias.

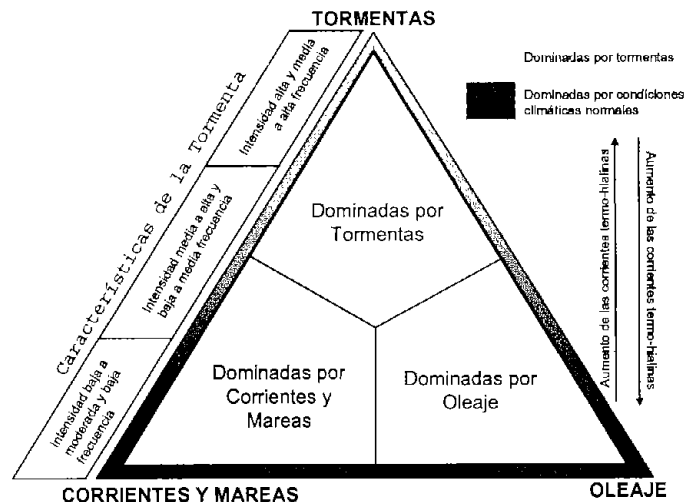


Figura V.1. Clasificación de plataformas de acuerdo a la predominancia de los procesos hidráulicos

FACIES DE PLATAFORMA CONTINENTAL

La plataforma continental es generalmente un conjunto de diversas facies sedimentarias. Por un lado, las plataformas modernas están limitadas hacia el continente por varios ambientes costeros y hacia el mar por el talud continental; por otro, los depósitos relictos son comunes en muchas plataformas. Durante regresiones marinas, diversos ambientes continentales y de costa permanecen expuestos sobre la superficie de plataforma. Estos ambientes forman estructuras como barras de barrera, valles de ríos e inclusive dunas sobre los sedimentos de plataforma. Y durante las transgresiones, estas estructuras son abandonadas, sumergidas y eventualmente incorporadas dentro de la columna sedimentaria de la plataforma. Algunos de estos sedimentos relictos se encuentran claramente retrabajados por corrientes y oleaje dentro de una facies que refleja varios ambientes sedimentarios.

La mayoría de los geólogos sedimentarios usan una columna estratigráfica como una herramienta básica para la interpretación de las facies, apoyándose en mapas y cualquier otro apoyo para el entendimiento e interpretación del origen de los estratos. Comúnmente se desatienden los aspectos tridimensionales de las facies y subfacies. Es muy importante considerar las variaciones laterales, extensiones y discontinuidades. El tamaño y forma de los cuerpos sedimentarios son probablemente los datos fundamentales utilizados en su análisis. No es raro que algunas secuencias estratigráficas estén incompletas, esto es, que se encuentren presentes discordancias. La actividad tectónica también puede intervenir, resultando en la ausencia de ciertas partes de la secuencia y la duplicación de otras. Estas situaciones pueden provocar que el trabajo de los geólogos, determinando la geometría original de los cuerpos sedimentarios y por ende la reconstrucción paleoambiental, sea más difícil.

Las facies sedimentarias que se encuentran en las plataformas son esencialmente arenas, lutitas y mezclas de unas y otras. Son distinguidas por su geometría externa, su relativa orientación respecto a las corrientes dominantes y características internas, reflejando procesos depositacionales.

Uno de los problemas más frecuentes en el análisis de sedimentos de plataforma es la atribución de algunas estructuras sedimentarias a un agente genético, por ejemplo, las corrientes de marea de flujo y reflujo suelen moverse por caminos diferentes en mares

abiertos e incluso en los deltas mareales, produciendo cada una de ellas estructuras unidireccionales similares a las que generaría una corriente oceánica que barriese el fondo. En consecuencia, el diagnóstico debe basarse en la demostración de carácter reversible del flujo y en la variabilidad periódica de la corriente que mueve y acumula el sedimento, a partir de dos rasgos de la estructura interna y la sucesión de períodos de procesos hidráulicos.

Existen otras maneras de clasificar las facies de plataforma. La tabla V.1. fue desarrollada por Johnson (1978) a partir de datos de Boersma (1975) y muestra el espectro continuo de facies de plataforma, en respuesta de las condiciones energéticas.

FACIES	SUBFACIES	ESTRUCTURA INTERNA	% ARENA	ESPESOR	PROCESOS SEDIMENTARIOS Y OBSERVACIONES
FACIES DE ARENISCAS "S"	S. Estratificación cruzada	estratificación cruzada tabular o en surco	90-100%	20-200cm	Migración de <i>megaripples</i> de crestas rectas y sinuosas de escala variable
	S. Laminación paralela	laminación paralela o cruzada de ángulo bajo		variable	Laminación formada por corrientes u olas con condiciones de alta energía
	S. Laminación cruzada	laminación cruzada		1-5cm	Migración de <i>ripples</i> de corriente, oscilación o combinados
FACIES HETEROLÍTICAS "H"	H. Arena dominante	laminación paralela	75-90%	5-20cm. máx. 200	Alterancias de capas de areniscas con laminación paralela y cruzada. Las capas más gruesas de arenisca pueden abarcar del 20 al 90%. Frecuentes amalgamaciones. La arena se deposita como carga de fondo y desde la suspensión, con retrabajado de intensidad variable por <i>ripples</i> de corriente y de oscilación. La arena se deposita durante las tormentas fuertes y puede contener restos de conchas transportados. La bioturbación aumenta en las intercalaciones de grano fino.
		laminación paralela y cruzada		5-20cm. máx. 200	
		laminación paralela y cruzada en surco		5-20cm. máx. 50	
		estratificación cruzada tabular aislada		5-20cm. máx. 50	
		laminación flaser en arena		1-5cm	
	H. Mezclas de arena y lutita	laminación paralela	50-75%	1-10cm	Especialmente areniscas con laminación cruzada y lutitas con capas subordinadas de areniscas con laminación paralela (10-15%). Laminación cruzada variable según el tipo de <i>ripple</i> (corriente, oscilación o combinado). Pueden reconocerse los depósitos de buen tiempo y tormenta. La parte alta de las capas de areniscas está bioturbada.
		de laminación paralela a laminación cruzada		1-10cm	
		laminación de bajo ángulo		1-10cm	
		laminación flaser y ondulada		1-5cm	
	H. Lutita dominante	laminación paralela	10-50%	1-5cm	Especialmente laminación lenticular con algunas capas de areniscas laminadas (5-10%). Las lentes de arena se forman por corrientes u olas. Las areniscas, por suspensión durante tormentas. En buen tiempo, depósito de finos en suspensión que luego suelen ser intensamente bioturbados.
laminación paralela y cruzada		1-5cm			
laminación lenticular		1-5cm			
FACIES DE LUTITAS "M"	M	arenas gradadas o capas ricas en conchas	0-10%	0,1-2cm	Lutitas y alguna capta de areniscas. Depósito de suspensión. Olas y corrientes sók actúan durante las tormentas muy fuertes. Bioturbación intensa. Faurias bentónicas <i>in situ</i> o casi.
	M	lutitas		Menor de 0,5cm	

Tabla V.1. Facies de plataforma de acuerdo a las condiciones energéticas

○ Facies de areniscas (S, por la palabra inglesa *sandstone*) consiste esencialmente de arenas y comprende a su vez tres subfacies en función del tipo de estructuras sedimentarias: con estratificación cruzada, con laminación paralela y con laminación cruzada. La movilidad del sustrato impide la colonización por organismos, de manera que hay pocos restos orgánicos y pistas fósiles.

○ Facies heterolítica (H, por *heterolithic*) incluye las asociaciones de arena y arcilla y comprende tres subfacies en virtud de la proporción entre ambas, dependientes de las variaciones periódicas, de las condiciones hidrodinámicas y el aporte de sedimento. En las capas de arenisca suelen encontrarse restos transportados de vegetales y la bioturbación aumenta hacia el techo de dichas capas.

- Facies lutítica (M, por *mudstone*) consiste esencialmente de arcillas y comprende dos subfacies según aparezcan, o no, intercalaciones de material más grueso, fosilífero o bioclástico. Corresponde a condiciones de energía muy baja en zonas situadas por debajo del nivel de base del oleaje y sin corrientes importantes. Las condiciones del depósito pueden precisarse en muchos casos a partir del estudio de comunidades bentónicas.

De acuerdo con la clasificación de Reading (1986), basada en las variaciones en el régimen hidrodinámico, así como en los cambios en el suministro de sedimentos, existe una serie de modelos para las facies de plataforma. Los modelos que a continuación se tratan, están basados en la suposición de que la línea de costa prograda hacia el mar con el tiempo y sólo pueden ser usados para períodos cortos, durante los cuales el nivel del mar es más o menos constante.

- Alto aporte de terrígenos
 - Baja energía de olas y aporte de lodo. Bajo condiciones prevalecientes de olas de baja energía, los sedimentos de la zona de rompiente (shoreface) son ricos en lodos limosos cubiertos por una delgada capa de arena de playa y la zona intermarea (foreshore). En aguas más profundas, son encontrados lodos de diferente naturaleza. Una porción de los lodos es aportada directamente por las bocas de los ríos hacia su localización final de depósito, donde la otra porción es retrabajada por tormentas moderadas a lo largo de la parte más baja de la shoreface y redepositado como lodos finos en aguas más profundas.
 - Baja energía de las olas y alto aporte de arena y lodo. El espesor de las arenas de shoreface incrementa considerablemente; puede incluir barras de arena de mar abierto (offshore) y capas arenosas en la zona de transición hacia aguas más profundas. Hacia el offshore, nuevamente una facies característica son las capas de lodos bioturbados alternados con sedimentos autóctonos arenosos y arcillosos.
 - Mar dominado por tormenta, alto aporte de arena y lodo. La facies arenosa, en lugares con grava, con estratificación cruzada representa una gran porción de las secciones verticales. Parte de las arenas transportadas por tormenta hacia aguas más profundas pueden ser retrabajadas por corrientes de tormenta y oceánicas subsecuentes.
 - Mar dominado por marea. Las corrientes de marea pueden afectar los procesos sedimentarios a profundidades mayores a los 50 metros. Los modelos son caracterizados por cuerpos arenosos ampliamente extendidos. Las corrientes de marea generan ondulaciones características en las arenas, las cuales pueden mostrar cubiertas de lodo.
 - Corrientes de fondo. Diferentes tipos de rizaduras y alineaciones de corrientes proveen evidencia de frecuente actividad de corrientes de fondo.
- Bajo aporte de terrígenos
 - Olas dominantes, aporte de lodo. La baja sedimentación de siliciclastos facilita altas concentraciones de constituyentes biogénicos y bioturbación más intensa. Las

acumulaciones de conchas son mayores. Los sedimentos de la plataforma exterior puede volverse margas, porque contienen, relativamente, altas proporciones de carbonato biogénico de origen tanto bentónico como planctónico.

- Zona de mínimo oxígeno. Los sedimentos resultantes son arcillas bituminosas y margas, las cuales pueden contener algunos horizontes de caliza y pedernal. La bioturbación está limitada a ciertos horizontes o completamente ausente.
- Mares dominados por tormentas y mareas. La progradación de la costa está limitada y el límite entre la playa y la plataforma se vuelve sutil. El retrabajo constante debido a la acción de las tormentas tiende a producir amalgamación en la zona transicional entre shoreface – offshore, superficies erosivas y capas condensadas en aguas profundas
- Plataformas afectadas por corrientes oceánicas de fondo. En la zona de shoreface, los procesos depositacionales se parecen a los de una zona dominada por olas y con aporte de lodo (5), pero a una mayor profundidad, un fuerte y repetitivo retrabajo incluye la mezcla de arenas viejas y jóvenes. La grava puede ser concentrada y las secciones verticales son caracterizadas por muchas superficies erosivas. Si la tasa de sedimentación disminuye demasiado, incluyendo períodos de no depósito, se pueden formar minerales de glauconita y bajo condiciones especiales crecer nódulos de fosforita. La bioturbación tiende a cambiar considerablemente de capa a capa.

De acuerdo a las estructuras que se encuentran en las plataformas, un modelo general de facies (figura V.2.) las divide en:

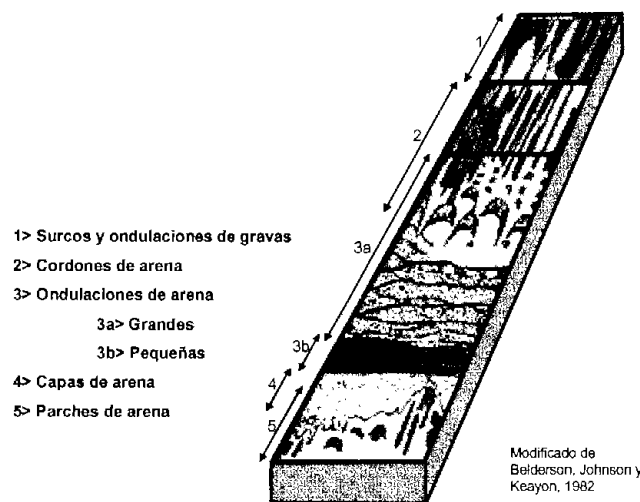


Figura V.2. Modelo general de facies arenosas de plataforma siliciclásticas

- Surcos y ondulaciones de grava. Los surcos se presentan donde las velocidades de las corrientes exceden 150 cm/s. Las corrientes excavan rasgos erosionales que varían de depresiones a surcos de hasta 15m de profundidad, 150 km de longitud y 5 km de anchura. Las ondulaciones son estructuras transversales construidas de gravas con elevaciones y son de alrededor de 1 m de alto y longitudes de onda de 10 m.

○ Cordones de arena o “sand ribbons”. Consisten de franjas de arena, en ocasiones alternadas con gravas. Pueden ser de 15 km de largo, de 200 m de ancho y no mayores a 10m de espesor. Con altas velocidades de corriente, los cordones de arena pueden formar ondulaciones de crestas rectas.

○ Ondulaciones de arena o “sand waves”. Son estructuras transversales de gran y pequeña escala, generalmente con crestas rectas y taludes bien definidos. Pueden ser simétricas o asimétricas y por estas últimas se entienden cambios de la corriente. Flujos opuestos con energías equivalentes producen ondulaciones simétricas, mientras que el dominio de uno o la decadencia del otro componente les produce un frente con una ligera inclinación (15-30°) La longitud puede variar desde decenas, hasta cientos de metros y la máxima amplitud es alrededor de un tercio de la profundidad del agua. Las corrientes cambiantes retrabajan los frentes, creando una múltiple reactivación de las superficies y disminuyendo la inclinación (5-15°).

Las rizaduras y las dunas comúnmente se encuentran sobrepuestos en los frentes, dejando un registro sedimentario complejo.

La acción de las olas previene la formación de las ondulaciones en plataformas de poca profundidad. La profundidad máxima para el desarrollo de las ondulaciones depende de la energía de las corrientes (mínima 65 cm/s)

○ Parches de arena. Pueden ser longitudinales o transversales con relación a la dirección de las corrientes, además se ensanchan corriente arriba y se presentan normalmente en zonas donde las velocidades promedio son menores a 50 cm/s y son insuficientes para mover eficientemente la arena; normalmente están cubiertos por rizaduras

○ Montículos, cordilleras, bancos de arena o “sand ridges”. (figura V.3.) Son estructuras lineales de gran escala. Sus ejes mayores tienden a estar orientados con respecto a la dirección de las corrientes de marea principales. Y migran lateralmente en la dirección de la corriente más débil. Regularmente consisten de arena fina a media, bien clasificada. Las conchas son un accesorio común. La estratigrafía interna consiste en capas inclinadas de bajo ángulo, depositadas sobre el flanco más empinado de la cordillera. En la zona litoral están asociados con deltas y estuarios dominados por mareas ya que para su formación requieren velocidades de corriente que excedan los 50 cm/s. Como las ondulaciones, las cordilleras se presentan en agrupaciones separadas entre sí por varios kilómetros. La proporción entre longitud y anchura comúnmente excede 40:1.

Estas cinco primeras facies son consideradas como las facies arenosas o de plataforma interna, pero además se menciona una “zona o facies de lodos”, considerada como la facies lodosa o de plataforma externa.

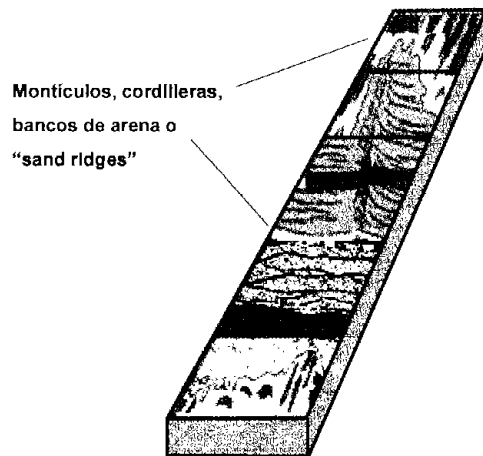


Figura V.3. Montículos de arena

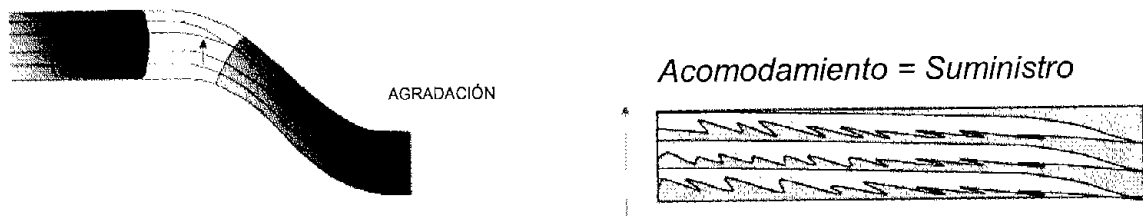
o Zonas o facies de lodos. Su depósito es controlado por la energía de las corrientes, la efectividad del oleaje y la concentración de sedimentos suspendidos. Las facies de lodos más extensas se encuentran hacia condiciones de mayor profundidad, donde las corrientes disminuyen su energía. Lodos bioturbados indican aguas de fondo bien mezcladas e intervalos de depositación moderados o retrabajo marino. Lodos finamente laminados indican estratificación de las masas de agua y condiciones de estancamiento en el fondo. Las capas de lodo que contienen icnofósiles indican un rápido depósito o retrabajo frecuente. Superficies consolidadas o firmes, caracterizadas por organismos sésiles y cementación singenética o perfiles de alteración, reflejan la falta de depositación. Los rasgos de depósito son del orden de 15.5 cm cada 100 años en corrientes del orden de 30cm/s.

Hipóticamente estas facies se encontrarán distribuidas a lo largo de la plataforma desde la línea de costa hacia mar adentro en el orden descrito. La distribución y desarrollo de estas facies estará influida por el aporte de sedimentos hacia la plataforma.

ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PLATAFORMA SILICICLÁSTICA

La estratigrafía de la plataforma es determinada por el balance entre el aporte de sedimento (cantidad y textura del sedimento) y la creación de espacio de acumulación, la cuál al mismo tiempo es la suma de la subsidencia, cambios en el nivel eustático y el grado en que los sedimentos viajan al talud. En cuanto a su arreglo estratigráfico, los sistemas de plataforma siliciclástica pueden ser:

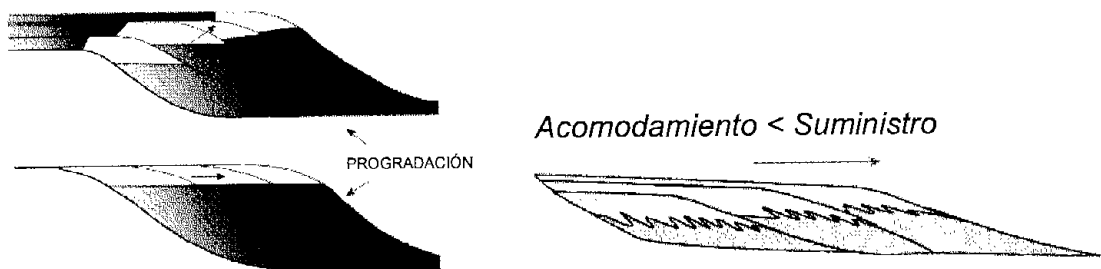
o Plataformas agradacionales (figura V.4.), muestran un balance entre el suministro de sedimento y el relativo incremento en el nivel del mar. Resultando en plataformas con sucesiones gruesas. Las sucesiones pueden consistir de un ciclo, comúnmente unidades que engruesan hacia arriba o pueden ir de homogéneas a heterolíticas.



Emery, 1999; Galloway, 1989

Figura V.4. Plataformas agradacionales

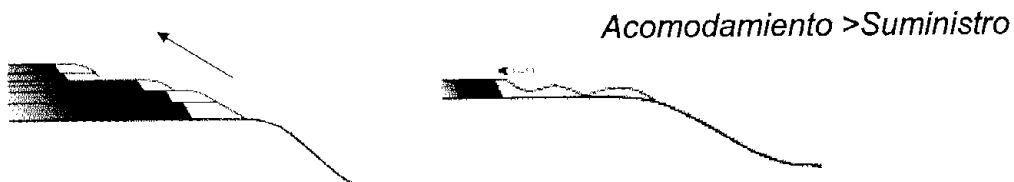
○ Plataformas progradacionales (figura V.5.), reflejan agradación y traslado del margen de plataforma. El aporte de sedimento excede al acomodamiento de los granos. Los depósitos gradúan de la zona de costa a las facies de talud.



Emery, 1999; Galloway, 1989

Figura V.5. Plataformas progradacionales.

○ Plataformas transgresivas o retrogradacionales (figura V.6.), se presentan cuando el acomodamiento supera el suministro de sedimento. Donde la energía de tormenta y de marea es suficiente, se forman barras arenosas a lo largo de la plataforma interna y desaparecen conforme aumenta la profundidad del agua. En ocasiones, sedimentos retrabajados de la costa y depósitos transgresivos costeros a lo largo de la plataforma interna, generalmente se acumulan como arena autóctona y láminas de lodo.



Emery, 1999; Galloway, 1989

Figura V.6. Plataformas transgresivas o retrogradacionales.

○ Plataformas erosionadas y/o de sobrepaso (figura V.7.), son caracterizadas por el no depósito, acompañadas de una corriente cortante local o regional sobre áreas poco profundas de la plataforma interna y bancos de arena. Las plataformas erosionadas se forman durante cualquiera de las siguientes condiciones:

- Transgresión o descenso relativo del nivel del mar
- Períodos de caída del nivel del mar

- Períodos de decremento del aporte de sedimento, o incremento en la energía del flujo.

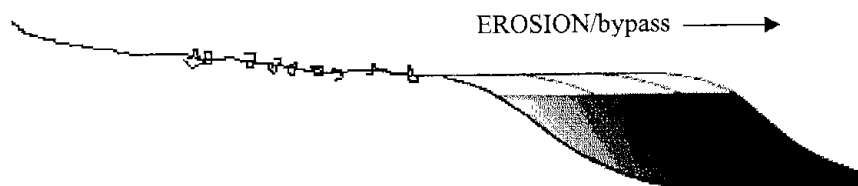


Figura V.7. Plataformas erosionadas.

Los grandes períodos de erosión se producen cuando se presenta una subsidencia insignificante y el suplemento de sedimento re trabajado fuera de la plataforma, donde éste alimenta un margen de plataforma progradante y al talud. El sedimento se acumula sobre la plataforma exterior y el límite de la plataforma o localmente en áreas profundas o protegidas a lo largo de la plataforma. La superficie de las plataformas erosionadas presenta horizontes de conchas, nódulos de fósforos y moldes de canales.

SÍSMICA Y REGISTROS GEOFÍSICOS

Una muy valiosa fuente de información en los análisis ambientales es aportada por los datos sísmicos y los registros geofísicos. La importancia de este tipo de datos se ha incrementado con el desarrollo tecnológico de los últimos 20 años de una nueva rama de la interpretación sísmica conocida como Estratigrafía sísmica.

Dos procedimientos fundamentales en la Estratigrafía sísmica, que soportan el análisis de las facies sedimentarias son:

- Análisis de secuencias sísmicas: la delineación de secuencias depositacionales por el análisis de los datos sísmicos. Las secuencias sísmicas son la expresión sísmica de la secuencia depositacional, o sea, un paquete de reflexiones sísmicas de sedimentos depositados en una unidad específica de tiempo. Y es muy importante tener en mente que en el análisis de secuencias, las reflexiones sísmicas generalmente indican superficies de tiempo, no necesariamente superficies de litofacies.
- Análisis de facies sísmicas: el examen del carácter reflexivo para definir ambientes depositacionales. Una facies sísmica es una unidad tridimensional de reflexiones cuyas características difieren en algunos aspectos de las reflexiones adyacentes, es decir, que describe el carácter y configuración de reflexiones sísmicas resultantes del ambiente depositacional. Una facies sísmica es así, la respuesta sónica a una litofacies.

Dos usos muy importantes de los registros de pozos en el análisis de facies, son indicadores verticales del tamaño del grano en las curvas del potencial espontáneo y de rayos gamma, relacionándolas con la resistividad del intervalo. Usados en conjunto, pueden ser una herramienta muy poderosa en el diagnóstico de ambientes. La figura V.8. muestra las respuestas geofísicas de algunos modelos sedimentarios.

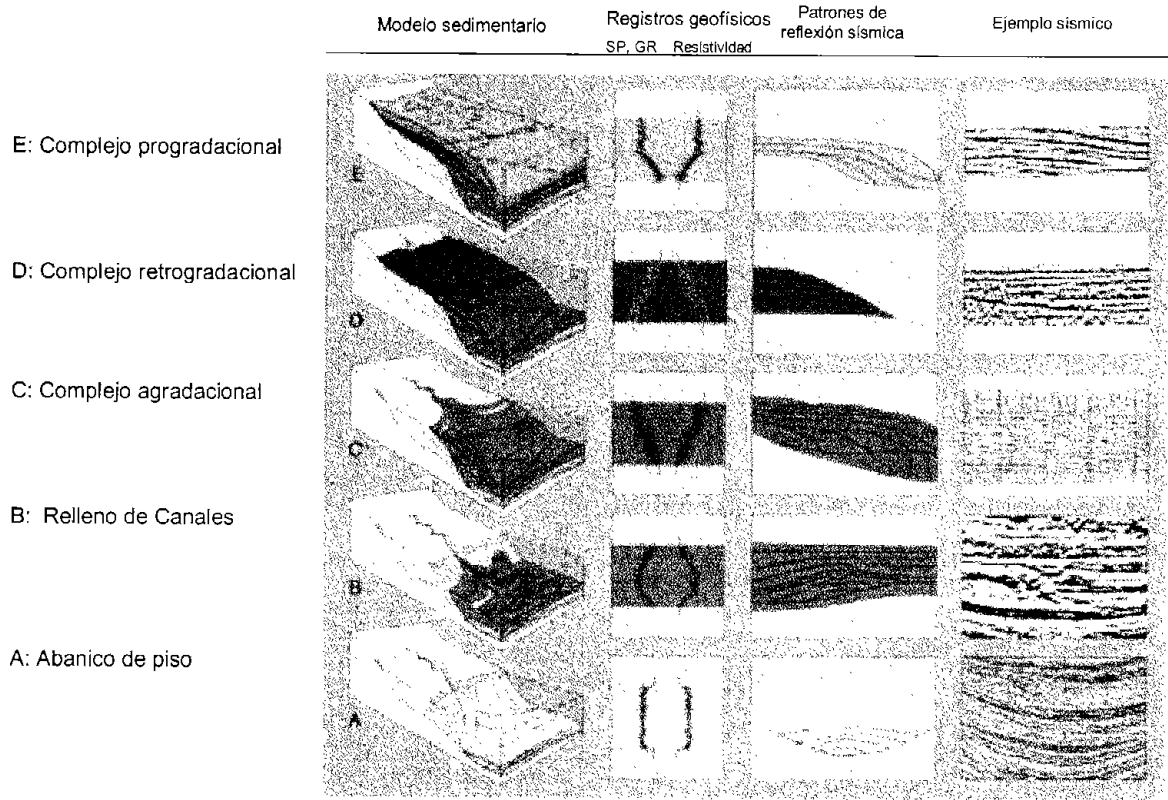


Figura V.8. Respuestas geofísicas de modelos sedimentarios (archivo PEMEX).

V.2. Descripciones

Dentro de los tres núcleos de fondo cortados en el pozo se encuentran diversas estructuras sedimentarias, predominantemente causadas por la biotubación de la zona.

NÚCLEO DE FONDO 1 (2220-2229 m)

La bioturbación abundante ha destruido la mayoría de los rasgos sedimentarios primarios, sin embargo, a los 2220.70 metros se observa lo que pudiera ser estratificación no-paralela, ondulada e indistinta, en la cima de un ciclo delgado grano-creciente.

Muchas galerías subhorizontales están tan retrabajadas por Anconichnus que no se pueden identificar con certidumbre en la mayoría de los casos. Zoophycos (¿?) y Paleophycus se observan comúnmente en estos sedimentos, y con mucho menor abundancia se aprecian Chondrites, Planolites, Teichichnus, Terebellina y Thalassinoides. Las formas irreconocibles de bioturbación incluyen formas ovaladas subhorizontales aplanadas (3-6mm de diámetro) y rellenas de lodo. También se observan unas cuantas galerías horizontales indistintas rellenas de arena

NÚCLEO DE FONDO 2 (2478-2487 m)

La textura entremezclada de los sedimentos del núcleo se debe a la bioturbación penetrante. Unos cuantos intervalos más arenosos de 1.0 a 2.0 metros de espesor se observan, pero no se aprecian ciclos grano-crecientes definidos con claridad.

A diferencia de los sedimentos del núcleo 3, no existe una tendencia general del tamaño de grano de los sedimentos. A pesar de que la bioturbación ha destruido la mayoría de los rasgos sedimentarios primarios, a los 2483.52 metros se observa lo que pudiera ser estratificación no-paralela, indistinta ondulada.

Se observan muchas galerías subhorizontales tan retrabajadas por Anconichnus que no se pueden identificar. Zoophycos (¿?), Chondrites y Paleophycus se observan de forma bastante común, con cantidades mucho menos comunes de Planolites, Teichichnus, Terebellina y Thalassinoides. Formas irreconocibles de bioturbación incluyen formas ovaladas aplanadas subhorizontales.

NÚCLEO DE FONDO 3 (2625-2634 m)

La textura entremezclada de los sedimentos se debe a la bioturbación penetrante. Los sedimentos en este núcleo son más arenosos en la parte superior del núcleo, lo que sugiere un ciclo general grano-creciente. También se observan ciclos más pequeños, de 1.5 a 2.0 metros de espesor, grano-crecientes pero menos distintivos.

A los 2630.10 metros se observa lo que pudiera ser estratificación indistinta ondulada, no paralela. Sin embargo, la bioturbación es tan abundante que no se presentan otras estructuras sedimentarias primarias. La Anconichnus es la morfología dominante de icnofósil observada en este núcleo, y también se observan Zoophycos (¿?) y Paleophycus a todo lo largo. Se aprecian cantidades menores de Planolites, Chondrites, Teichichnus, Terebellina, Thalassinoides y Cylindrichnus (¿?). Las formas irreconocibles de bioturbación incluyen formas ovaladas, aplanadas, subhorizontales, pequeñas (3-6 mm de diámetro) y rellenas de lodo. Muchas galerías subhorizontales están tan retrabajadas por Anconichnus que no se pueden identificar. La pirita autigénica finamente diseminada se observa a través del intervalo nucleado, y es más evidente en las lutitas de color más oscuro. Se aprecian fracturas subhorizontales, rellenas de lodo, entre los 2629.75 y 2629.82 metros.

Un segmento de registro geofísico del pozo Lankahuasa-1 (figura V.9.) muestra el mismo patrón que siguen otros pozos, como el Lankahuasa DL-1, Atún-3, Pargo-1 y Escualo-2, donde las líneas representan secuencias progradantes y granocrecientes de numerosas parasecuencias apiladas en el ambiente marino plataformal. El intervalo de aumento del registro abarca las pruebas de producción y manifestaciones 3 y 4, donde la parte basal es de grano fino, que progresivamente se muestra más grueso hacia arriba.

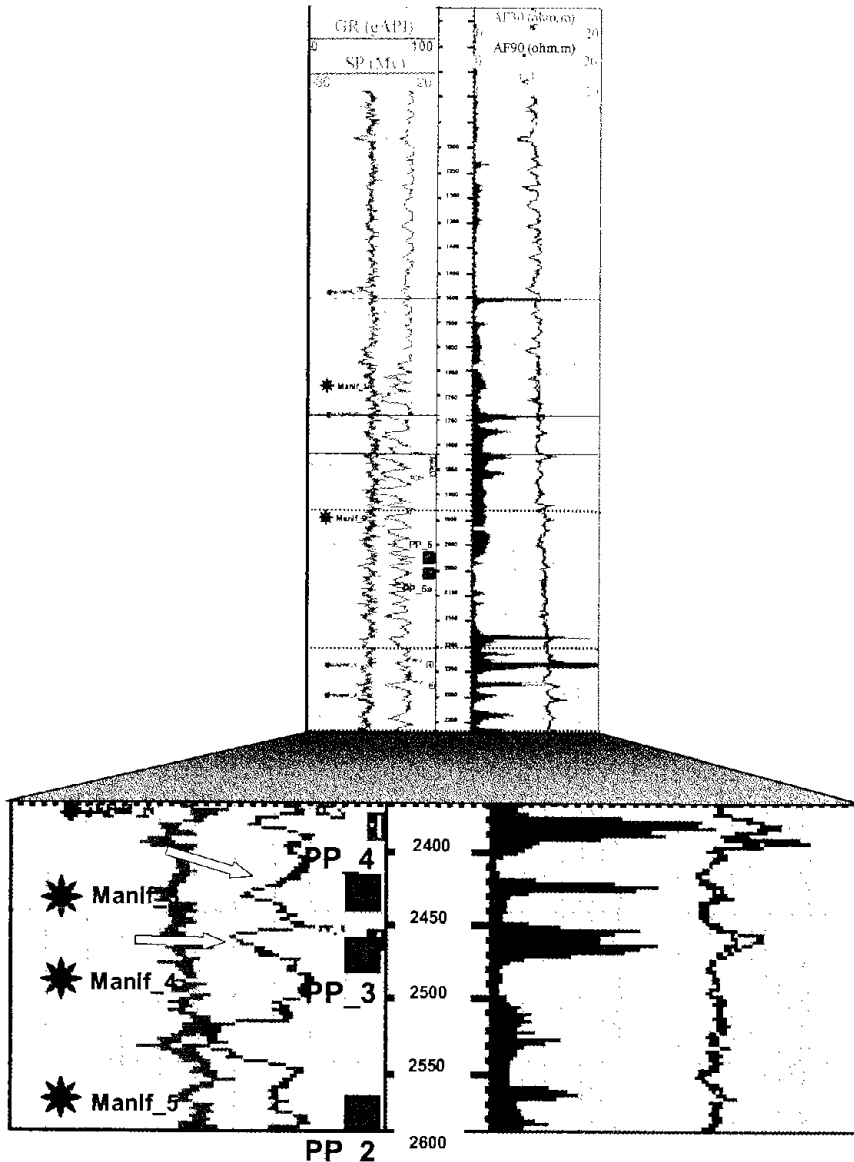


Figura V.9. Registro geofísico del pozo Lankahuasa-1.

V.3. Resultados

AMBIENTE DE DEPÓSITO

El ambiente de depósito es claramente transicional (marino), de plataforma marginal o pericontinental. Dentro de los sedimentos de estudio, se han reconocido al menos 5 de los 6 tipos principales de sedimentos de plataforma: Clásticos, Biogénicos, Residuales, Autigénicos y Volcánicos.

FACTORES QUE CONTROLAN LA SEDIMENTACIÓN EN LA PLATAFORMA

FACTORES FÍSICOS:

Con respecto a las **fluctuaciones en el transporte de sedimento**, no existen evidencias de marcadas diferencias en la entrada de material terrígeno. La **topografía del piso marino**, no es un factor de primordial importancia en este caso. Sin embargo el **retrabajo de sedimentos** es muy notorio y afectó en gran medida a los sedimentos estudiados. La **subsistencia y cambios relativos en el nivel del mar** estuvieron presentes con mayor intensidad aproximadamente a partir del Mioceno Superior (± 10 M.a).

Al parecer el factor físico más importante que actuó y análogamente actúa en el área es el **régimen hidráulico**, el cual se analizará más adelante, al describir la clase de plataforma.

FACTORES QUÍMICOS

La presencia de Glauconita hace pensar en un ambiente de agua fría con entre 10 y 200 m de profundidad, y la Pirita autógena, en los bajos niveles de oxígeno.

FACTORES BIOLÓGICOS

Las areniscas se encuentran fuertemente bioturbadas, y su tipo indica un ambiente de baja energía (en su mayoría Cruziana) con una lenta sedimentación de grano fino dentro de un clima regular. La bioturbación es tan abundante, que ha destruido la mayoría de los rasgos sedimentarios. Las galerías de Zoophycos y Chondrites, son sugestivas de niveles bajos de oxígeno (ambientes anóxicos) y la materia orgánica abundante sugiere ambientes de plataforma de agua calmada.

CLASIFICACIÓN DE LA PLATAFORMA

De acuerdo con la clasificación de Shepard (1977), basada en la tectónica y el clima del ambiente de depósito, las arenas denotan una **plataforma con cordilleras y montículos de arena**.

De acuerdo con el esquema de Reading (1986), retomado por Galloway y Hodbay (1996), la plataforma frente a las costas de Veracruz, fue y es **dominada por oleaje**, donde la distribución final de los sedimentos se debe principalmente a tormentas y ciclones, que destruyen parcialmente los festones de arena que se llegan a formar frente a la desembocadura del delta (figura V.10.). Estas características parecen haber sido dominantes durante todo el Neógeno. Además correspondiente a una facies de alto aporte de terrígenos (arena y lodo) con baja energía de olas.

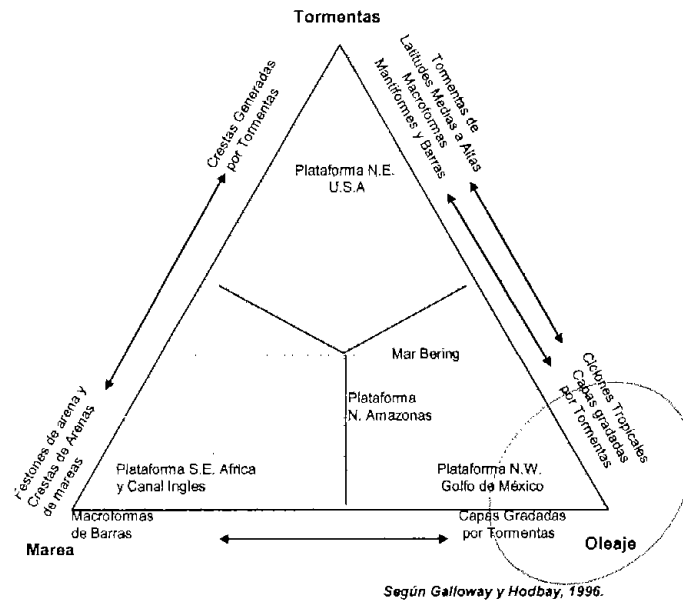


Figura V.10. Ubicación de la plataforma NW del Golfo de México según Galloway y Hodbay.

FACIES DE PLATAFORMA CONTINENTAL

Según el esquema de Johnson (1978), las areniscas estudiadas, cumplen con una **facies heterolítica**, ya que incluyen asociaciones de arena y lutita, además se observan restos orgánicos transportados y la abundante bioturbación.

De acuerdo con el modelo general de facies arenosas en plataformas, las muestras denotan una **zona de montículos, cordilleras o bancos de arena**.

ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PLATAFORMA

En cuanto a su arreglo estratigráfico, el sistema es de **plataforma progradacional**, ya que refleja agradación y traslado del margen de plataforma. Esto sucede cuando el aporte de sedimento excede al acomodamiento de los granos.

VI. PALEONTOLOGÍA

VI.1. Marco teórico

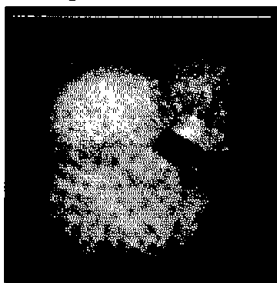
Dentro de los núcleos y las esquiras se encuentra una de las más grandes ayudas en el análisis y estudio del pozo, ya que la paleontología siempre ha jugado un papel importante en la identificación de los ambientes del subsuelo. Los microfósiles son los más abundantes en el registro paleontológico ya que generalmente sobreviven a la acción de la barrena, mientras que los macrofósiles llegan a ser fragmentados y generalmente no son identificables. Dado que varios tipos de microfósiles florecieron en diferentes marcos depositacionales, sus restos proporcionan indicaciones sumamente valiosas de los ambientes sedimentarios. Otro aspecto importante de los microfósiles es en la bioestratigrafía, como cronómetros del tiempo geológico. Las dos variedades más importantes de microfósiles empleados en el análisis de ambientes son los foraminíferos y los ostrácodos, siendo los primeros los mayormente usados. La razón principal para su importancia es que algunos subórdenes y géneros de los foraminíferos y ostrácodos son bentónicos (moradores del fondo) y viven solamente en ambientes específicos de acuerdo a la profundidad y salinidad. Así, cuando se les encuentra como conjunto de fósiles en el mismo lugar en donde vivieron, se les llama una Biozona y proporcionan un indicador directo del marco depositacional.

VI.2. Descripciones

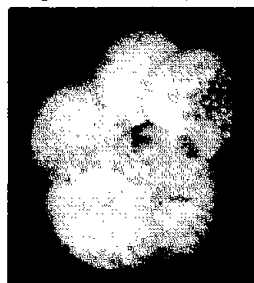
La paleontología en los tres núcleos es básicamente la misma, en todos ellos, la naturaleza altamente entremezclada de los sedimentos de los núcleos se debe a los organismos que retrabajaron los sedimentos poco después del sepultamiento (bioturbación). Fragmentos de plantas, clásticos carbonáceos (probablemente fragmentos pequeños de plantas) y fragmentos esqueléticos indeterminables se observan a través de los núcleos. Fragmentos más grandes y reconocibles de moluscos (1-5cm) y fragmentos de foraminíferos también se observan a todo lo largo.

Dentro del núcleo 1, se presentan esqueletos de gasterópodos. En el núcleo 2, se observan conchas bien conservadas, pero sin un arreglo estratigráfico. Y dentro del núcleo 3, los fragmentos de plantas son menos abundantes en la parte superior del núcleo.

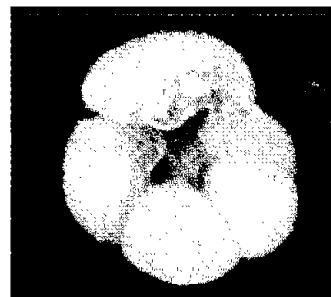
La fauna existente es principalmente: *Sphaeroidinellopsis disjuncta* (fotografía VI.1.), *Globorotaloides variabilis*, *Sphaeroidinellopsis multiloba* (fotografía VI.2.), *Globoquadrina dehiscens* (fotografía VI.3.).



Sphaeroidinellopsis
disjuncta



Sphaeroidinellopsis
multiloba



Globoquadrina
dehiscens

Fotografías VI.1, VI.2, VI.3. Fauna principal del pozo Lankahuasa-1.

Los microfósiles generalmente sobreviven a la acción de la barrena y gran cantidad de ellos se recobran de los recortes del pozo, mientras que los macrofósiles llegan a ser fragmentados y generalmente no son identificables por operaciones de corte. Con la micropaleontología de las esquirlas fue posible desarrollar la columna paleontológica del pozo (tabla VI.1.).


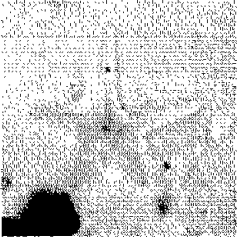
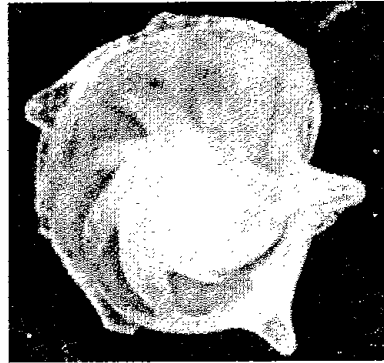
Profundidad (mbmr)	Edad	M.a.	Fósil índice	Batimetría
0m	INDETERMINADO		Sin muestras	
515m		2.4Ma		
730m	PLIOCENO MEDIO	3.4Ma	Globorotalia exilis, Globigerinoides obliquus extremus	NERÍTICO INTERNO-MEDIO
2215m	PLIOCENO INFERIOR		Globorotalia margaritae margaritae (foto)	NERÍTICO
				
3139m		5.3Ma	Triquetrorhabdulus rugosus, Nannoplancton calcáreo: Discoaster Berggrenii (foto)	NERÍTICO EXTERNO
				

Tabla VI.1. Columna paleontológica del pozo Lankahuasa-1.

VI.3. Resultados

Los sedimentos perforados en el pozo son datados en el Neógeno. El estudio del pozo inició en el Plioceno Medio, con un espesor de 215 m aproximadamente, este intervalo se caracteriza por la abundancia y diversidad de especies tanto planctónicas como bentónicas, dominando las especies planctónicas en cuanto a diversidad y las especies bentónicas en cuanto a abundancia. Los microfósiles índices que datan estos sedimentos son principalmente: *Globorotalia exilis*, *Globigerinoides obliquus extremus*; la fauna se encuentra en su mayoría bien preservada, salvo algunos ejemplares piritizados principalmente bentónicos.

Debido a la presencia de *Marginulinopsis marginulinoides* y *Amphistegina lessonii*, se considera a este intervalo dentro del nerítico interno – medio y cabe mencionar que en la mayoría de las muestras está presente la especie *Lenticulina americana* (fotografía VI.4.) considerada típicamente del nerítico interno.



1015 m

Lenticulina americana

Fotografía VI.4. *Lenticulina americana*.

A 730 mbmr, se da la cima del Plioceno Inferior con un espesor considerable de 1485 m aproximadamente, datado con la primera aparición de *Globorotalia margaritae margaritae*, en este intervalo se observa la escasez de microfauna comparado con los sedimentos del Plioceno Medio que le sobreyacen. Este paquete de sedimentos está caracterizado por el dominio de especies planctónicas sobre las bentónicas en cuanto a diversidad se refiere y por la mayor abundancia de especies bentónicas, algunas de ellas pertenecientes al nerítico medio a externo.

A 2215 mbmr, se da la cima del Mioceno Superior, con un espesor de 924 m hasta la profundidad total del pozo, 3139mbmr. Para poder datar este intervalo, fue necesario el estudio del nannoplancton calcáreo en muestras de canal y de los 3 núcleos. Las especies de nannoplancton calcáreo que se identificaron son: *Discoaster berggrenii*, *Discoaster druggii*, *Discoaster quinqueramus*, *Pontosphaera multipora*, entre otros. Este intervalo, se caracteriza por la escasa fauna planctónica y bentónica observada. En el Mioceno Superior, la fauna bentónica estuvo pobremente representada en cuanto a su abundancia y diversidad, no obstante, marca una ligera tendencia hacia el nerítico medio-externo.

VII. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los intervalos de roca productora de gas, que atravesó el pozo Lankahuasa-1 corresponden a litarenitas arcillosas de color gris verdoso a gris claro de grano muy fino a fino (0.063-0.083 mm), con buena clasificación, que va de subredondeado a redondeado, con una alta esfericidad, entremezcladas de forma compleja con unidades depositacionales típicamente delgadas de lutitas de color gris a gris verdoso oscuro (figura VII.1.).

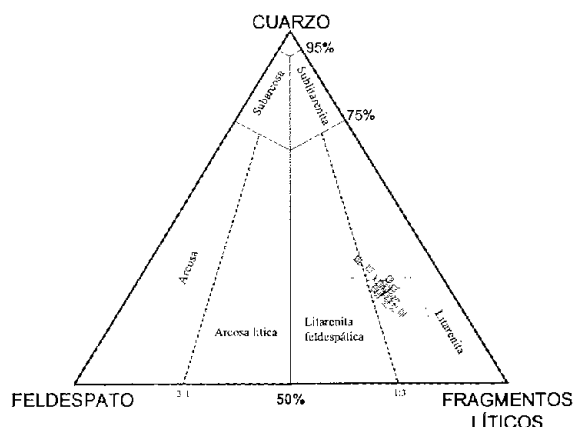


Figura VII.1. Diagrama ternario de composición para las areniscas del pozo Lankahuasa-1.

Su porosidad es del 12% en promedio y la permeabilidad tiene un valor menor a 1 milidarcy. El valor de la porosidad es de carácter regular y cabe remarcar que es principalmente de tipo intergranular e intragranular; pero el valor de la permeabilidad es muy bajo, quizá ocasionado por los puentes de material carbonatado que se encuentran cerrando la conexión entre poros, visibles en las imágenes del microscopio electrónico.

En cuanto a la madurez textural, las muestras caen dentro de los intervalos: maduro y supermaduro, lo que habla de un retrabajo intenso debido principalmente al régimen hidráulico persistente en la cuenca de depósito.

Los fragmentos líticos en orden de importancia son: caliza, roca ígnea y pedernal, esto indica la presencia de dos fuentes principales para las rocas del Mioceno, esto es, una fuente de rocas carbonatadas y pedernal de la sección cretácica en la Cordillera Oriental de la Sierra Madre y una fuente de roca ígnea.

El mapa (figura VII.2.) muestra que las provincias de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico, así como los altos de la Plataforma de Tuxpan y Santa Ana, aportaron los sedimentos líticos a través de ríos antecedentes como Nautla, Cazones, Tecolutla y Pánuco, a lo largo de la costa del Golfo de México.

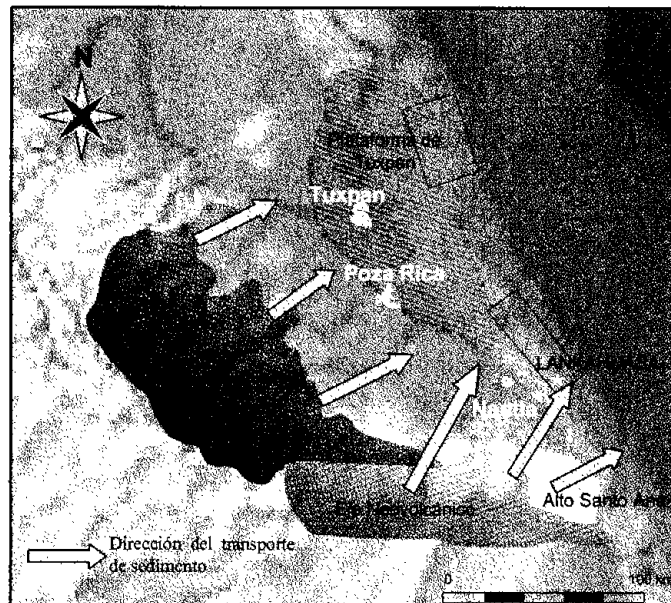


Figura VII.2. Mapa de procedencia de sedimentos líticos.

El grado de diagénesis de las areniscas es inmaduro, ya que no existe un alto porcentaje de minerales de diagénesis avanzada, como la illita; tampoco hay evidencia de abundante compactación química o contactos suturados entre granos, etc.

El sedimento es principalmente de tipo alóctono, o sea, importado a la plataforma por flujos generados principalmente por los ríos, el oleaje y las tormentas; los dos últimos siendo los factores físicos más importantes y que controlaron la sedimentación.

La bioturbación abundante ha destruido la mayoría de los rasgos sedimentarios primarios, ocasionalmente se observa lo que pudiera ser estratificación no-paralela, ondulada e indistinta, en la cima de ciclos delgados grano-crecientes. Fragmentos de plantas, clásticos carbonáceos (probablemente fragmentos pequeños de plantas) y fragmentos esqueléticos indefinibles se observan a través de los núcleos. Fragmentos más grandes y reconocibles de moluscos y de foraminíferos también se observan a todo lo largo. Muchas galerías subhorizontales están tan retrabajadas, que no se pueden identificar con certidumbre en la mayoría de los casos, unas cuantas están rellenas de arena y lodo.

Estas características de bioturbación (además de los fragmentos de concha) son consistentes con la interpretación de un ambiente depositacional de zona de transición, en su mayoría por debajo de la base de las olas de tormenta (retrabajo significativo).

Entre los procesos químicos más interesantes destaca la génesis de minerales autigénicos, la presencia de glauconita y piritita hace pensar en un ambiente con relativa lenta sedimentación terrígena, de agua fría y calmada, con entre 10 y 200 m de profundidad, y niveles bajos de oxígeno.

Con todos los resultados de los estudios, la interpretación sobre la clasificación de la plataforma sostiene un ambiente dominado por el oleaje, con breves intervenciones de tormentas. Las arenas estudiadas, correspondientes a los intervalos productores de hidrocarburo en el pozo Lankahuasa-1, formaron cordilleras, montículos o barras de arena;

dentro de una evolución progradante y agradante, cuyos sedimentos fueron altamente retrabajados y desarrollaron una buena madurez.

Actualmente la información sísmica ha sido de gran soporte en el entendimiento de los modelos sedimentarios y la sección sísmica ha permitido reconocer la presencia de secuencias progradantes y agradantes donde se pueden identificar geometrías típicas de sistemas depositacionales deltaicos y de barras de barrera, en las partes neríticas, mientras que hacia el talud y la cuenca se identifican geometrías de abanico de talud y de piso de cuenca, así como canales y cañones submarinos (figura VII.3.).

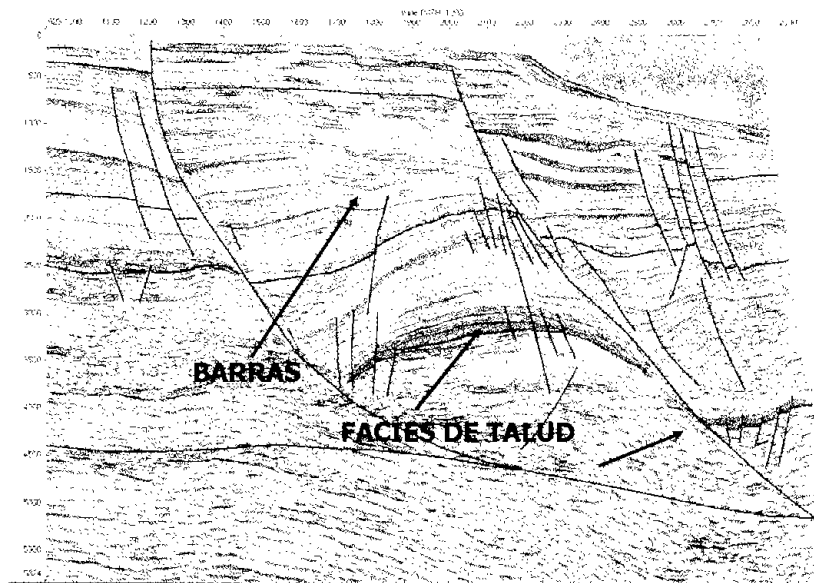


Figura VII.3. Inline 1200 del Cubo Lankahuasa Centro

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con la metodología seguida en este trabajo, se ayuda a disminuir el riesgo geológico y comercial, al facilitar la detección de yacimientos que incorporen reservas adicionales de gas, definir con mayor precisión los modelos geológicos, generar prospectos exploratorios con alta probabilidad de éxito y optimar el desarrollo de los campos cretácicos descubiertos y que están por descubrirse en el Terciario, con la finalidad de incrementar la oferta de gas y aceite ligero en el corto y mediano plazo.
- La secuencia terrígena cortada por el pozo Lankahuasa-1, tiene una litología que se compone de litarenitas de color gris claro de grano fino, maduras, en matriz arcillo-calcárea y lutitas gris verdoso, plásticas, ligeramente arenosas y calcáreas.
- En los intervalos productores se observaron rocas de buena porosidad (entre 9 y 16%, promedio de 12%), intercaladas con areniscas más compactas. Se observó microporosidad en la matriz, sin embargo las gargantas de poro son generalmente muy pequeñas. También se observaron cantidades muy marginales de porosidad intragranular .
- El tamaño promedio de las partículas en las areniscas es de 0.063 mm a 0.083 mm, aunque esporádicamente encuentran granos más grandes. Consisten principalmente de cuarzo y fragmentos de roca con cantidades menores de feldespato potásico y plagioclasa. Estas arenas están generalmente bien clasificadas y presentan gargantas de poro entre 5 y 20 micrómetros.
- Los poros de las areniscas se encuentran ocluidos en distintas proporciones por partículas de 2-10 micrómetros, que consisten de cuarzo, calcita y probables arcillas cementadas por calcita, por lo que se obtienen bajos valores de permeabilidad.
- A partir del Altos de Santa Ana y la Sierra Madre Oriental, durante el Mioceno, creció un sistema de plataformas clásticas progradantes que se extendió hacia al oriente. La acumulación de sedimento disparó el crecimiento de fallas de expansión que se propagaron hacia el oriente en tanto las plataformas se movían en el mismo sentido.
- Factores físicos, químicos y biológicos participan en la composición de sedimentos individuales en diversas proporciones y sus interrelaciones también son indicativas de las condiciones de depósito. Las condiciones sedimentarias son muy variadas y su clasificación no es fácil siendo el ambiente de sedimentación lo que representa una mayor complejidad. En este caso se puede concluir, que de acuerdo a los análisis realizados, el modelo sedimentario teórico, que más se aproxima a las condiciones vistas son las barras o bancos de arena.
- El contenido de materia orgánica se incrementa con el decremento en el tamaño de grano y donde el agua más fría retarda su desintegración, esto genera que el grado

de bioturbación sea potencialmente muy elevado, haciendo irreconocible en muchos casos la estructura original. La acción de los organismos modifica profundamente las características del sedimento, especialmente en su parte superior. Las capas de conchas reflejan intenso retrabajo y las condiciones de más alta energía.

- Basándose en el análisis petrográfico, sedimentológico y microfaunístico de las muestras de canal, se concluye que las rocas del Mioceno Superior se depositaron en un ambiente nerítico medio.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el presente estudio como base de futuros trabajos de investigación para la obtención de información más detallada del pozo Lankahuasa-1.
- Después de analizar las propiedades de las rocas almacén del pozo Lankahuasa-1, se recomienda que la explotación del yacimiento sea por un estrangulador adecuado para evitar abatir rápidamente la presión del yacimiento.
- Para entender mejor las características de porosidad y permeabilidad de los intervalos productores que no fueron nucleados se recomienda un estudio de análisis de imágenes de poros.
- Para entender la distribución geográfica de la trampa, es recomendable realizar estudios a detalle de las respuestas sísmicas de las rocas del Mioceno, mediante software especializado.
- Un análisis a detalle de los registros geofísicos tomados en el pozo Lankahuasa-1, así como de estudios petrofísicos, podría complementar el presente trabajo.

ANEXOS

Lista de Figuras

Figura II.1.	Mapa de localización del pozo Lankahuasa-1
Figura III.1.	Ubicación e la línea sísmica
Figura III.2.	Línea sísmica de la costa oriental de México
Figura III.3.	Línea sísmica con dirección Oeste-Este
Figura III.4.	Línea sísmica con dirección Norte-Sur
Figura IV.1.	Tipos de clasificación
Figura IV.2.	Clasificación de Powers
Figura IV.3.	Empaques y porosidades
Figura IV.4.	Diagrama de Folk para la madurez textural
Figura IV.5.	Clasificación de Folk para las areniscas
Figura IV.6.	Gráfica de porosidad vs. profundidad
Figura IV.7.	Gráfica de permeabilidad vs. profundidad
Figura IV.8.	Gráfica de composición de los fragmentos líticos
Figura IV.9.	Diagrama ternario para la composición de las areniscas
Figura IV.10.	Secuencia de eventos diagenéticos
Figura V.1.	Clasificación de plataformas de acuerdo a la predominancia de los procesos hidráulicos.
Figura V.2.	Modelo general de facies arenosas de plataformas siliciclásticas
Figura V.3.	Montículos o bancos de arena
Figura V.4.	Plataformas agradacionales
Figura V.5.	Plataformas progradacionales
Figura V.6.	Plataformas transgresivas o retrogradacionales
Figura V.7.	Plataformas erosionadas
Figura V.8.	Respuestas geofísicas de modelos sedimentarios
Figura V.9.	Registro geofísico del pozo Lankahuasa-1
Figura V.10.	Ubicación de la plataforma NW del Golfo de México según Galloway y Hodbay.
Figura VII.1.	Diagrama ternario de composición para las areniscas del pozo Lankahuasa-1.
Figura VII.2.	Mapa de procedencia de sedimentos líticos
Figura VII.3.	Inline 1200 del Cubo Lankahuasa Centro

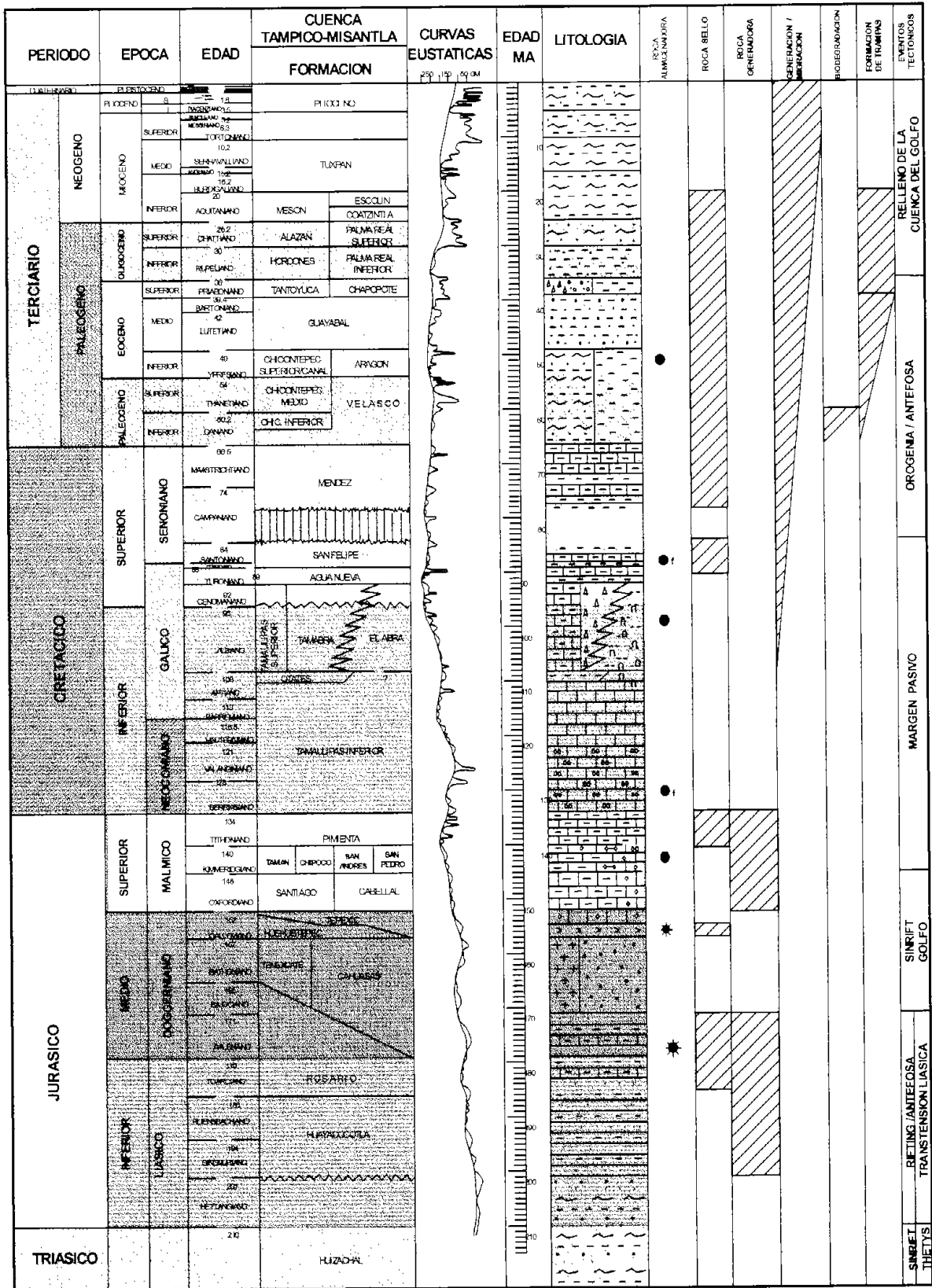
Lista de Tablas

Tabla II.1	Coordenadas del pozo Lankahuasa-1
Tabla II.2	Tuberías de revestimiento
Tabla II.3	Tipos y densidades de lodo
Tabla II.4	Manifestaciones de gas
Tabla II.5	Registros geofísicos tomados en el pozo
Tabla II.6	Intervalos de interés petrolero
Tabla II.7	Pruebas de producción
Tabla III.1	Columna geológica propuesta para el pozo Lankahuasa-1
Tabla III.2	Columna geológica real para el pozo Lankahuasa-1
Tabla IV.1	Escala de Wentworth para el tamaño de grano
Tabla IV.2	Relación entre la procedencia y composición de areniscas
Tabla IV.3	Composición de las areniscas
Tabla V.1.	Facies de plataforma de acuerdo a las condiciones energéticas
Tabla VI.1.	Columna paleontológica del pozo Lankahuasa-1

Lista de Fotografías

Fotografía IV.1.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.2.	Profundidad: 2660.0 metros
Fotografía IV.3.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.4.	Profundidad: 2430.0 metros
Fotografía IV.5.	Profundidad: 2220.5 metros
Fotografía IV.6.	Profundidad: 2224.2 metros
Fotografía IV.7.	Profundidad: 2479.5 metros
Fotografía IV.8.	Profundidad: 2482.0 metros
Fotografía IV.9.	Profundidad: 2484.0 metros
Fotografía IV.10.	Profundidad: 2626.0 metros
Fotografía IV.11.	Profundidad: 2629.0 metros
Fotografía IV.12.	Profundidad: 2634.0 metros
Fotografía IV.13.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.14.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.15.	Profundidad: 2660.0 metros
Fotografía IV.16.	Profundidad: 2660.0 metros
Fotografía IV.17.	Profundidad: 2575.0 metros
Fotografía IV.18.	Profundidad: 2575.0 metros
Fotografía IV.19.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.20.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.21.	Profundidad: 2475.0 metros
Fotografía IV.22.	Profundidad: 2475.0 metros
Fotografía IV.23.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.24.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.25.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.26.	Profundidad: 2430.0 metros
Fotografía IV.27.	Profundidad: 2430.0 metros
Fotografía IV.28.	Profundidad: 2435.0 metros
Fotografía IV.29.	Profundidad: 2435.0 metros
Fotografía IV.30.	Profundidad: 2020.0 metros
Fotografía IV.31.	Profundidad: 2020.0 metros
Fotografía IV.32.	Profundidad: 2065.0 metros
Fotografía IV.33.	Profundidad: 2065.0 metros
Fotografía IV.34.	Profundidad: 2220.85 metros
Fotografía IV.35.	Profundidad: 2220.85 metros
Fotografía IV.36.	Profundidad: 2221.83 metros
Fotografía IV.37.	Profundidad: 2221.83 metros
Fotografía IV.38.	Profundidad: 2226.05 metros
Fotografía IV.39.	Profundidad: 2226.05 metros
Fotografía IV.40.	Lámina delgada que muestra fragmentos de microclina y cuarzo.
Fotografía IV.41.	Profundidad: 2478.25 metros
Fotografía IV.42.	Profundidad: 2478.25 metros

Fotografía IV.43.	Profundidad: 2485.0 metros
Fotografía IV.44.	Profundidad: 2485.0 metros
Fotografía IV.45.	Profundidad: 2626.8 metros
Fotografía IV.46.	Profundidad: 2626.8 metros
Fotografía IV.47.	Profundidad: 2630.8 metros
Fotografía IV.48.	Profundidad: 2630.8 metros
Fotografía IV.49.	Porosidad en fracturas
Fotografía IV.50.	Profundidad: 1476.0 metros
Fotografía IV.51.	Profundidad: 1476.0 metros
Fotografía IV.52.	Profundidad: 1476.0 metros
Fotografía IV.53.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.54.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.55.	Profundidad: 2655.0 metros
Fotografía IV.56.	Profundidad: 2660.0 metros
Fotografía IV.57.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.58.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.59.	Profundidad: 2580.0 metros
Fotografía IV.60.	Profundidad: 2585.0 metros
Fotografía IV.61.	Profundidad: 2470.0 metros
Fotografía IV.62.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.63.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.64.	Profundidad: 2480.0 metros
Fotografía IV.65.	Profundidad: 2430.0 metros
Fotografía IV.66.	Profundidad: 2430.0 metros
Fotografía IV.67.	Profundidad: 2435.0 metros
Fotografía IV.68.	Profundidad: 2435.0 metros
Fotografía IV.69.	Profundidad: 2435.0 metros
Fotografía IV.70.	Profundidad: 2020.0 metros
Fotografía IV.71.	Profundidad: 2055.0 metros
Fotografía IV.72.	Profundidad: 2055.0 metros
Fotografía VI.1.	Fauna principal del pozo Lankahuasa-1. <i>Sphaeroidinellopsis disjuncta.</i>
Fotografía VI.2.	Fauna principal del pozo Lankahuasa-1. <i>Sphaeroidinellopsis multiloba.</i>
Fotografía VI.3.	Fauna principal del pozo Lankahuasa-1. <i>Globoquadrina dehiscens</i>
Fotografía VI.4.	<i>Lenticulina americana</i>



Columna geológica de la cuenca Tampico-Misantla

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ ALANIZ-ÁLVAREZ, S., NIETO-SAMANIEGO, F., TOLSON-JONES, G., 2004. *Léxico geológico mexicano*, Sociedad Geológica Mexicana.
- ✓ ARELLANO-GIL, J., YUSSIM-GUARNEROS, S. Dos casos de discordancias progresivas en las secuencias sedimentarias en México. UNAM. Facultad de Ingeniería.
- ✓ BARBOSA-CANO, F., 2000. *Exploración y reservas de hidrocarburos en México*. UNAM. Instituto de Investigaciones Económicas.
- ✓ BARRERA-ORTIZ, C., VEJAR-HERNANDEZ, M., JÁCOME-ORTEGA, G. Informe geológico final, pozo: Lankahuasa-1. Activo de Exploración y Producción, Región Norte, PEMEX.
- ✓ BLATT, H., 1992, *Sedimentary Petrology*, Freeman.
- ✓ BOGGS, S., 1987, *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*, Merrill.
- ✓ BRITO-BURGOS, A., SÁNCHEZ-LÚ, F., PATIÑO-RUIZ, J., ROMAN-RAMOS, J.R. El sistema petrolífero y la reactivación exploratoria en la porción marina de la plataforma de Tuxpan, México. PEMEX.
- ✓ DAVIS, A. R. *Depositional Systems, An introduction to sedimentology and stratigraphy*. Prentice Hall.
- ✓ EINSELE, G., 2000. *Sedimentary basins evolution, facies and sediment budget*. Springer-Verlag.
- ✓ FOLK, R.L., 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphil, Austin.
- ✓ GALLOWAY, W. E., HOBDAK, D. K. *Terrigenous clastic depositional systems, Applications to fossil fuel and groundwater resources*, Springer.
- ✓ GUZMÁN-BALDIZAN, A., 2000. Estado de la exploración petrolera en México. Boletín del 50 Aniversario de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Vol XLVIII, Números 1-2.
- ✓ HERNÁNDEZ-ROMANO, U., VÉLEZ-SCHOLVINK, D., RUIZ-RUIZ, H., MARTÍNEZ-GARCÍA, J., GHOSH, S., JACOBO-ALBARRÁN, J., 2004. Oligocene-Miocene sedimentation along the western gulf coast: insights from outcrops and subsurface data, onshore-offshore northern Veracruz, México. Guía de campo para las conferencias del congreso internacional de la AAPG.

- ✓ MORRIL, C. D., Petroleum geology: Conceptos y Métodos de Análisis de Facies del Subsuelo. THRDC-Video Library for Exploration and Production Specialist. PEMEX.
- ✓ PEMEX. Resumen ejecutivo de la localización Lankahuasa-1. Proyectos Marinos. Activo Misantla-Golfo de México, Exploración y Producción, Región Norte.
- ✓ PEMEX. Justificación técnica para realizar los estudios sismológicos de sísmica 3D, Activo Misantla-Golfo de México, Exploración y Producción, Región Norte.
- ✓ PEMEX, Las reservas de Hidrocarburos de México, vol. I y II. Exploración y Producción.
- ✓ PETTIJOHN, P., 1975. Sedimentary rocks. Harper & Row, Nueva York.
- ✓ PETTIJOHN, P., SIEVER, 1987, Sand and Sandstone, Springer-Verlag.
- ✓ SANTIAGO A., J., CARRILLO B., J., MARTELL A., B., 1984. Geología petrolera de México. Petróleos Mexicanos, Evaluación de Formaciones en México.
- ✓ SCHOLLE, A. P., 1979. Constituents, textures, cements, and porosities of sandstones and associated rocks. AAPG memoir 28.
- ✓ SCHOLLE, A. P., SPEARING, D., 1982. Sandstone depositional environment. AAPG, Memoir 31.
- ✓ VEJAR-HERNANDEZ, M., 2004. Informe geológico final, pozo: Lankahuasa-DL1. Activo de Exploración y Producción, Región Norte, PEMEX.
- ✓ VINIEGRA OSORIO, F., 1992. Geología Histórica de México. UNAM. Facultad de Ingeniería.
- ✓ WHITTEN, D. G. A., BROOKS, J. R. V., 1979. A dictionary of Geology. Penguin Books.
- ✓ ZDENEK-KUKAL., 1971. Geology of recent sediments.