

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“MODELAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DE LA ARENISCA U POR  
CICLOS SEDIMENTARIOS MENORES EN EL ÁREA  
MERIDIONAL DEL CAMPO SACHA”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA EN GEOLOGÍA**

Presentada por:

**Katherine Elizabeth Villavicencio Valero**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2015**

## AGRADECIMIENTO

Al Universo por colocar en el camino a las personas indicadas para el desarrollo de este trabajo. Al Ing. Pierre Kummert por su dedicación y paciencia; al Ing. Edison Navarrete por su apoyo y ayuda incondicional para culminar con éxito la investigación presente. Al Dr. Jorge Toro por compartir sus profundos conocimientos de estratigrafía y orientarme en los conceptos apropiados. A mis compañeros y profesores que me ofrecieron su ayuda para avanzar en el proceso necesario para mi graduación.

# DEDICATORIA

A MIS PADRES

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

MSc. Alby Aguilar  
PRESIDENTA

---

Ing. Edison Navarrete  
DIRECTOR DE TESIS

---

Dra. Katty López  
VOCAL PRINCIPAL



## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

Katherine Villavicencio

## RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el “Modelamiento estratigráfico de la Arenisca U por ciclos sedimentarios menores en el área meridional del Campo Sacha”; que se enfoca en la recreación de los ambientes sedimentarios en cada nivel que se genere por ciclos completos de transgresiones y regresiones.

Para ello se crearon dos modelos específicos de secuencias tipo para caracterizar una regresión y una transgresión; con datos previos de registros eléctricos de pozos se determina a que profundidad se encuentran las diferentes facies a las cuales se las denomina con un número.

Usando Fortran 95, un algoritmo que aplica Series de Fourier se suavizan las curvas que previamente se han generado con los modelos de secuencia tipo. Una vez que se determinaron los horizontes que corresponden a las superficies límites entre los cortejos sedimentarios en todos los pozos del centro del campo Sacha, se correlacionaron.

Luego se analizaron cuáles son las facies predominantes; y con este resultado se recrearon los ambientes en cada horizonte a partir de transgresiones y regresiones.

Finalmente esto sirve para determinar las zonas en las que se acumula el petróleo, en donde perforar para realizar recuperación secundaria y tener un modelo generalizado del comportamiento de la Arenisca U.

# ÍNDICE GENERAL

|                        |       |
|------------------------|-------|
| RESUMEN .....          | VI    |
| ÍNDICE GENERAL.....    | VIII  |
| ABREVIATURAS .....     | XVII  |
| SIMBOLOGÍA .....       | XVII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XVIII |
| ÍNDICE DE TABLAS ..... | XXIII |
| ÍNDICE DE MAPAS .....  | XXIV  |
| INTRODUCCIÓN .....     | XXV   |

## CAPÍTULO 1

|  |   |
|--|---|
| 1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO..... | 1 |
| 1.1 Descripción del Campo Sacha .....    | 1 |

|   |   |
|---|---|
| 1.2 Ubicación geográfica del área de estudio..... | 2 |
| 1.3 Geología del Campo Sacha .....                | 4 |
| 1.3.1 Estructura .....                            | 4 |
| 1.3.2 Columna Estratigráfica.....                 | 7 |
| 1.3.3 Características de la Arenisca U.....       | 8 |

## CAPÍTULO 2

|   |    |
|---|----|
| 2. CARÁCTERÍSTICAS GEOLÓGICAS ASOCIADAS A LA ARENISCA U.. | 10 |
| 2.1 Medios Continentales .....                            | 10 |
| 2.1.1 Medios de zonas áridas .....                        | 10 |
| 2.2 Medios fluviales .....                                | 11 |
| 2.2.1 Depósitos de barra de canal .....                   | 12 |
| 2.3 Medios de Transición .....                            | 13 |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.1 Medios Costeros .....                                       | 13 |
| 2.4 Estuarios .....   | 17 |
| 2.5 Transgresiones y Regresiones .....                            | 18 |
| 2.5.1 Variaciones del nivel del mar .....                         | 21 |
| 2.5.2 Cambios cíclicos del nivel del mar .....                    | 21 |
| 2.5.3 Criterios para reconocer transgresiones y regresiones.....  | 23 |
| 2.6 Cortejos Sedimentarios .....                                  | 25 |
| 2.6.1 Cortejo de bajo nivel .....                                 | 27 |
| 2.6.2 Cortejo transgresivo.....                                   | 29 |
| 2.6.3 Cortejo de alto nivel .....                                 | 31 |
| 2.6.4 Cortejo regresivo.....                                      | 33 |
| 2.7 Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Arenisca U ..... | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 2.7.1 Ciclo sedimentario I (Aptiano Superior-Albiano Superior).....                    | 36 |
| 2.7.2 Ciclo sedimentario II (Albiano Superior-Cenomaniano Medio) ..                    | 37 |
| 2.7.3 Ciclo sedimentario III (Cenomaniano Inferior a Medio – Turoniano Inferior) ..... | 38 |
| 2.7.4 Ciclo sedimentario IV (Turoniano – Campaniano Inferior) .....                    | 40 |
| 2.7.5 Ciclo sedimentario V (Campaniano – Maastrichtiano Inferior) .                    | 41 |

### CAPÍTULO 3

|   |    |
|---|----|
| 3. MÉTODOS DE CORRELACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS EN UN REGISTRO ELÉCTRICO DE POZOS ..... | 42 |
| 3.1 Métodos de correlación .....  | 42 |
| 3.1.1 Estratos marcadores.....  | 42 |
| 3.1.2 Coincidencia de patrones .....  | 43 |
| 3.1.3 Técnicas de corte.....  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2 Parámetros en un registro eléctrico de pozos ..... | 45 |
| 3.2.1 Potencial Espontáneo (SP).....                   | 45 |
| 3.2.2 Registro Resistivo (Rt).....                     | 46 |
| 3.2.3 Registro Gamma Ray (GR).....                     | 48 |
| 3.2.4 Registro Sónico.....                             | 49 |
| 3.2.5 Registro Caliper .....                           | 50 |
| 3.2.6 Registro de Densidad .....                       | 52 |
| 3.2.7 Registro neutrón .....                           | 53 |

## CAPÍTULO 4

|  |    |
|--|----|
| 4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SECUENCIAS SEDIMENTARIAS .....               | 55 |
| 4.1 Representación de una secuencia de facies .....                    | 55 |
| 4.2 Litologías identificadas a partir de los registros eléctricos..... | 56 |



|  |    |
|--|----|
| 4.2.1 Ordenamiento de las litologías en secuencias de facies .....       | 57 |
| 4.2.2 Secuencia-tipo global utilizada.....                               | 62 |
| 4.3 Procesamiento de las secuencias de facies .....                      | 65 |
| 4.4 Ciclos de transgresión y regresión .....                             | 66 |
| 4.5 Series de Fourier.....   | 67 |
| 4.5.1 Preparación de los datos .....                                     | 68 |
| 4.5.2 Determinación del número de frecuencias del desarrollo .....       | 69 |
| 4.5.3 Otras opciones de modificación de la curva original .....          | 72 |
| 4.6 Uso de Fortran 95 para alisamiento de curvas por serie de Fourier... | 74 |
| 4.6.1 Representación de los ciclos sedimentarios .....                   | 78 |
| 4.6.2 Descripción de eventos en el pozo SAC-021.....                     | 80 |
| 4.7 Obtención de ciclos sedimentarios menores .....                      | 81 |

## CAPÍTULO 5

|  |    |
|--|----|
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....  | 83 |
| 5.1 Interpretación de los ambientes sedimentarios generados por los ciclos sedimentarios menores ..... | 83 |
| 5.1.1 Tope de la Arenisca U Superior (Regresión) .....   | 83 |
| 5.1.2 Transgresión de la Arenisca U Superior (TST) .....   | 85 |
| 5.1.3 Segunda Regresión de la Arenisca U Inferior (HST) .....  | 86 |
| 5.1.4 Transgresión de la Arenisca U Inferior (TST) .....   | 87 |
| 5.1.5 Primera Regresión de la Arenisca U Inferior (LST).....   | 89 |
| 5.2 Corte estratigráfico en la Transgresión de la Arenisca U Inferior (TST)                            |    |

## CAPÍTULO 6

|  |    |
|--|----|
| 6. Conclusiones y Recomendaciones..... | 92 |
| 6.1 Conclusiones.....                  | 92 |
| 6.2 Recomendaciones.....               | 94 |

## ABREVIATURAS

|      |   |
|------|---|
| API  | American Petroleum Institute              |
| Bpd  | Barriles por día                          |
| CEM  | Compañía de Economía Mixta                |
| Fm   | Formación                                 |
| FSST | Flooding Surface System Track             |
| Ft   | Pies                                      |
| GR   | Gamma Ray                                 |
| HST  | High System Track                         |
| Km   | Kilómetro                                 |
| LST  | Low System Track                          |
| MFS  | Maximun Flooding Surface                  |
| MMBN | Petróleo Acumulado a Condiciones Estándar |
| MRS  | Maximun Regresion Surface                 |
| MV   | Mega voltio                               |
| NEE  | Noreste del este                          |
| Rt   | Registro Resistivo                        |
| SP   | Potencial Espontáneo                      |
| SSO  | Sur del suroeste                          |
| SWW  | Suroeste del oeste                        |
| TVD  | Profundidad Vertical Verdadera            |

## SIMBOLOGÍA

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| °C                | Grados centígrados         |
| g/cm <sup>3</sup> | Gramos/centímetros cúbicos |
| K                 | Potasio                    |
| Th                | Torio                      |
| U                 | Uranio                     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Ubicación del campo sachá .....  | 3  |
| Figura 1.2 Columna Estratigráfica Generalizada de la Cuenca Oriente.....                  | 7  |
| Figura 1.3 Registro Eléctrico del Pozo Sachá 028.....                                     | 9  |
| Figura 2.1 Relieve de un abanico aluvial en contacto con los sedimentos de<br>playa. .... | 11 |
| Figura 2.2 Barras de Canal Orientadas hacia la Dirección de la Corriente de<br>Agua. .... | 12 |
| Figura 2.3 Ambientes Sedimentarios de una Zona Costera. ....                              | 13 |
| Figura 2.4 Columna Estratigráfica de un Ciclo Regresivo de Playas .....                   | 16 |
| Figura 2.5 Medios Sedimentarios Asociados a un Estuario.....                              | 18 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.6 Escenarios de Subida del Nivel Relativo del Mar, .....           | 19 |
| Figura 2.7 Escenarios de Baja Relativa del Mar .....                        | 20 |
| Figura 2.8 Esquema de las Secuencias Tipo 1 y 2. ....                       | 27 |
| Figura 2.9 Cortejo de Bajo Nivel debido a la Regresión. ....                | 29 |
| Figura 2.10 Expresión Estratigráfica de un Estrato Transgresivo. ....       | 31 |
| Figura 2.11 Proceso depositacional producto de un Cortejo de Alto Nivel. .. | 33 |
| Figura 2.12 Esquema de un Cortejo Regresivo en un Ambiente Marino .....     | 35 |
| Figura 2.13 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario I. ....         | 37 |
| Figura 2.14 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario II. ....        | 38 |
| Figura 2.15 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario III. ....       | 39 |
| Figura 2.16 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario III. ....       | 40 |
| Figura 3.1 Representación De Un Registro Sp .....                           | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.2 Representación de un Registro de Resistividad Rt.....           | 47 |
| Figura 3.3 Representación de Registro Gamma Ray (Gr).....                  | 49 |
| Figura 3.4 Representación de un Registro Sónico.....                       | 50 |
| Figura 3.5 Representación de un Registro Caliper .....                     | 51 |
| Figura 3.6 Representación De Un Registro Density .....                     | 53 |
| Figura 3.7 Representación de un Registro Neutrón.....                      | 54 |
| Figura 4.1 Ordenamiento en secuencias de facies por nivel de energía. .... | 58 |
| Figura 4.2 Integración de las dos Secuencias de Facies.....                | 60 |
| Figura 4.3 Valores De Energía De Ambiente En.....                          | 62 |
| Figura 4.4 Curvas obtenidas por clasificación de facies .....              | 64 |
| Figura 4.5 Ecuación de una Serie de Fourier .....                          | 67 |
| Figura 4.6 Representación de un Ciclo Completo en una Serie de Fourier ..  | 69 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 4.7 Representación de la Varianza Residual por número de frecuencias.....                    | 70 |
| Figura 4.8 Representación de las Curvas procesadas por número de frecuencias (ciclo puro).....      | 71 |
| Figura 4.9 Secuencia Tipo De Tres Facies.....   | 73 |
| Figura 4.10 Antes y Después del desarrollo de la Serie de Fourier.....                              | 74 |
| Figura 4.11 Curvas de Varianza Residual ..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>                  |    |
| Figura 4.12 Interfaz del Fortran 95, Ingresando el código de un .....                               | 75 |
| Figura 4.13 Selección del Algoritmo para procesamiento de la Curva.....                             | 76 |
| Figura 4.14 Despliegue de la Varianza Residual .....  | 77 |
| Figura 4.15 Resultado del Procesamiento de los Archivos <i>.las</i> con el Programa Fortran 95..... | 78 |
| Figura 4.16 Representación de los Ciclos Sedimentarios Menores.....                                 | 79 |

Figura 4.17 Representación De Los Eventos Ocurridos En Los Ciclos De  
Transgresiones Y Regresiones..... 81

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla I Coordenadas Geográficas del Campo Sacha..... | 3  |
| Tabla II Secuencia Tipo Global Utilizada .....       | 63 |

## ÍNDICE DE MAPAS

|   |    |
|---|----|
| Mapa I Mapa Estructural De La Arenisca U Del Campo Sacha .....          | 6  |
| Mapa II Mapa de una Regresión (Rst) en la Arenisca U Superior. ....     | 84 |
| Mapa III Mapa de una Transgresión (Tst) en la Arenisca U Superior. .... | 85 |
| Mapa IV Mapa de una Regresión (Hst) en la Arenisca U Inferior. ....     | 87 |
| Mapa V Mapa de una Transgresión (Tst) en la Arenisca U Inferior. ....   | 88 |
| Mapa VI Mapa de una Regresión (Lst) en la Arenisca U Inferior.....      | 89 |
| Mapa VII Corte Estratigráfico de SO-NE en el TST .....                  | 91 |

## INTRODUCCIÓN

El 3 de septiembre de 2009 Operaciones Rio Napo se constituye como la primera empresa ecuatoriana de economía mixta, 70% PETROAMAZONAS EP y 30% PDVSA ECUADOR S.A. Operaciones Rio Napo CEM suscribió un contrato de Servicios Específicos con la EX PETROPRODUCCIÓN para la administración, incremento de la producción, desarrollo y exploración del campo SACHA.

Con las actividades realizadas por Operaciones Rio Napo CEM, la producción del campo se ha incrementado en 36% con respecto a la producción que mantenía en el año 2009; es decir, se ha incrementado desde 50.000 bpd hasta 68.000 bpd (abril 2013).

Las reservas de petróleo probadas en SACHA se encuentran localizadas en cuatro yacimientos principales, denominados: Hollín, T inferior, U inferior y Basal Tena. El volumen total de petróleo originalmente en sitio (POES) de todo el campo es de 3 501 MMBN de petróleo, siendo las reservas probadas

de 1 205 MMBN, lo que presenta un factor de recobro del 34,4% del POES. El 54,9 % de estas reservas se encuentra localizado en la Formación Hollín, el 24,3 % en la arena U inferior, el 19,5 % en la arena T inferior y el 1,3 % en la Formación Basal Tena.

Operaciones Rio Napo CEM ha llevado a cabo una campaña de perforación intensiva, incluyendo la perforación de pozos de avanzada, mediante la cual se ha extendido los límites de los yacimientos, ocasionando el incremento de oportunidades de nuevas reservas. Un estudio en progreso de actualización de los Modelos Estáticos y Dinámicos de los yacimientos del campo ha señalado un incremento del 67% del POES, creando expectativas de incremento de reservas por encima de los 200 MMB de petróleo.

Las formaciones Napo, Hollín y Basal Tena en la Cuenca Oriente presentan características definidas dentro de un modelo de estratigrafía secuencial. Las variaciones eustáticas están evidenciadas en sus miembros clásticos, las cuales ocurrieron a escala global durante el periodo comprendido entre el Aptiano y el Maastrichtiano, reflejando cambios drásticos sean estos paleogeográficos, variaciones laterales de facies y fluctuaciones de la línea de costa de hasta 200 km dentro de la plataforma marina somera Oriente; según investigaciones realizadas en el libro “La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo” (2004).

Un estudio similar al presente, realizado en la tesis de grado “MODELO ESTRATIGRÁFICO POR CICLOS SEDIMENTARIOS MENORES DE LA ARENISCA U DE LA ZONA SUR EN EL CAMPO SACHA”, muestra las características que diferencian la Arenisca U Superior de la Inferior perteneciendo la primera a un ambiente estuarino de poca profundidad y la segunda a un ambiente estuarino profundo dominado por mareas.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal obtener un modelo estratigráfico de los ambientes sedimentarios asociados a la Arenisca “U” de la Formación Napo, para posteriormente y mediante otra investigación, determinar la identificación de zonas de acumulación del petróleo. Como objetivos secundarios están el procesar los archivos **.Ias** de los pozos en el Fortran 95 y luego en el programa Petrel para visualizar las curvas suavizadas con Series de Fourier; y con ello obtener los horizontes que representan cada evento transgresivo o regresivo para poder recrear los ambientes sedimentarios.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO**

### **1.1 Descripción del Campo Sacha**

El 21 de enero de 1969 la compañía Texaco – Gulf, perforó el pozo exploratorio Sacha 1, teniendo como objetivo el reservorio Hollín alcanzando una profundidad de 10160 (ft); produciendo 1328 bpd de 30° API.

Este campo comenzó a producir el 6 de julio de 1972, con una tasa promedio de 29269 bpd hasta 117591 bpd en noviembre de aquel año (Petroproducción, 2004).



Los yacimientos del campo Sacha que contienen hidrocarburos son: las areniscas Hollín, las arenas U y T de las formaciones Napo Basal, y la arenisca Basal Tena.

El volumen de reservas de hidrocarburos probadas del campo es de 3 501 MMBN, el 54,9% de las reservas están localizadas en la formación Hollín, el 24,3 en la Arena U Inferior, el 19,5% en la Arena T Inferior y el 1,3% en la formación Basal Tena.

## **1.2 Ubicación geográfica del área de estudio**

El campo Sacha está ubicado en la provincia de Orellana, se encuentra delimitado al norte por las estructuras Palo Rojo; al sur por los campo Culebra–Yulebra; al este por los campos Shushufindi–Aguarico y al oeste por los campos Pacuna, Paraíso y Huachito (Figura 1.1).

La Tabla indica las coordenadas geográficas de ubicación del Campo Sacha:

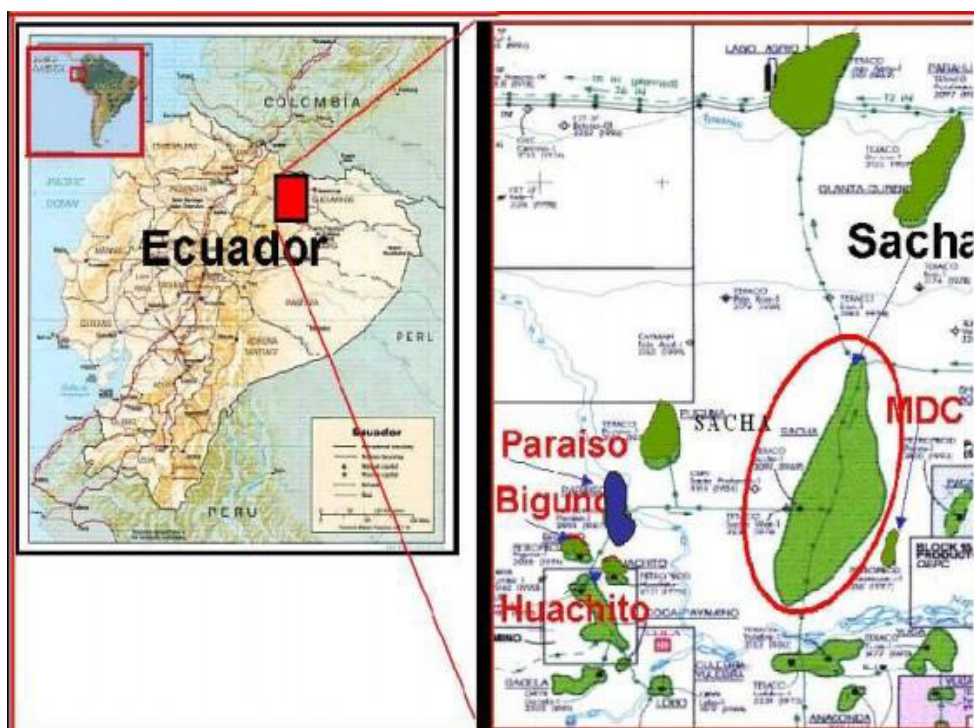


Figura 1.1 Ubicación del campo sachá  
Fuente: Archivo campo sachá, Petroproducción

Tabla I Coordenadas Geográficas del Campo Sacha

| <b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b> |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>LATITUD</b>                 | entre 0°10'00" S y 0°26'00" S   |
| <b>LONGITUD</b>                | entre 76°46'00" W y 76°54'00" W |

## **1.3 Geología del Campo Sacha**

### **1.3.1 Estructura**

El campo Sacha está constituido por un anticlinal con dirección NNE-SSO en el flanco occidental del corredor Sacha-Shushufindi, cortado por una falla inversa con un ligero buzamiento al oeste. Tiene una longitud aproximada de 33 Km, con un ancho de 4 Km al norte y 7 Km en el centro y sur (Mapa I).

Bajo la estructura Sacha de edad cretácica se desarrolló el anticlinal "Sacha Profundo", de posible edad Jurásico inferior-tardío a medio, que plegó los depósitos Paleozoicos y Triásico- Jurásicos de la Formación Sacha (Santiago), el mismo que fue probado con el pozo Sacha Profundo sin resultados positivos.

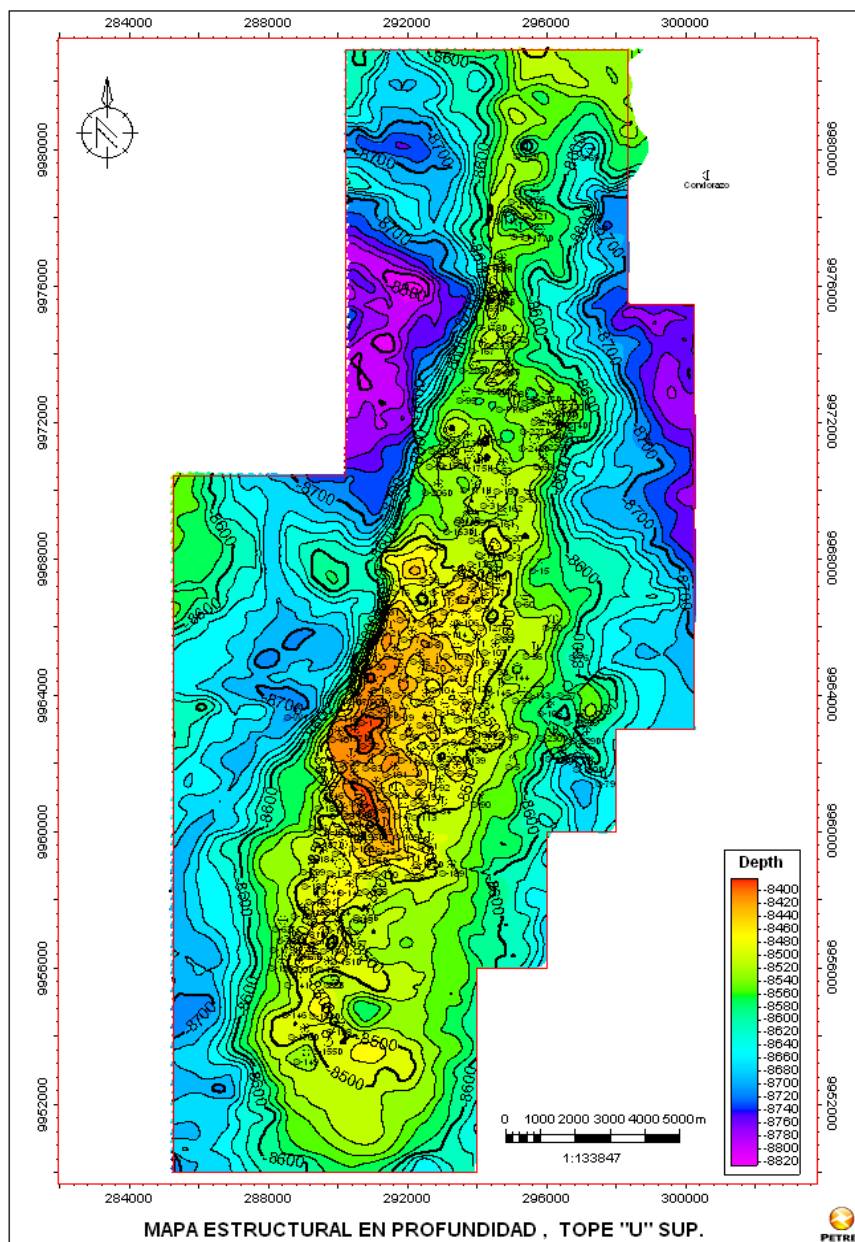
La estructura Sacha, al igual que Shushufindi, se formó en la primera etapa de inversión tectónica o sea entre el Turoniano Tardío y el Maastrichtiano.

La falla principal es segmentada por lo menos en tres secciones definidas por fallas laterales transpresivas dextrales de dirección NEE-SWW. El fallamiento inverso principal de dirección NNE-SSO no se

presenta como una sola falla continua, hay ciertos lugares que se observan solo flexuras en lugar de las fallas.

La falla que segmenta el campo tiene direcciones preferenciales NNE-SSW, se origina en el basamento, la cual posiblemente fue reactivada en más de una ocasión durante la depositación de los sedimentos, estos segmentos de falla llegan hasta la caliza M2.

Se observan saltos de falla de 10 a 60 pies al Norte, a nivel de la Formación Hollín, 150 pies en el centro-sur del campo.



Mapa II Mapa Estructural De La Arenisca U Del Campo Sacha  
**Fuente:** Archivo Operaciones Río Napo CEM

### 1.3.2 Columna Estratigráfica

La figura 1.2 muestra la Columna Estratigráfica general de la Cuenca Oriente, donde se indica las unidades estratigráficas, edades, ambientes, litología y origen tectónico.

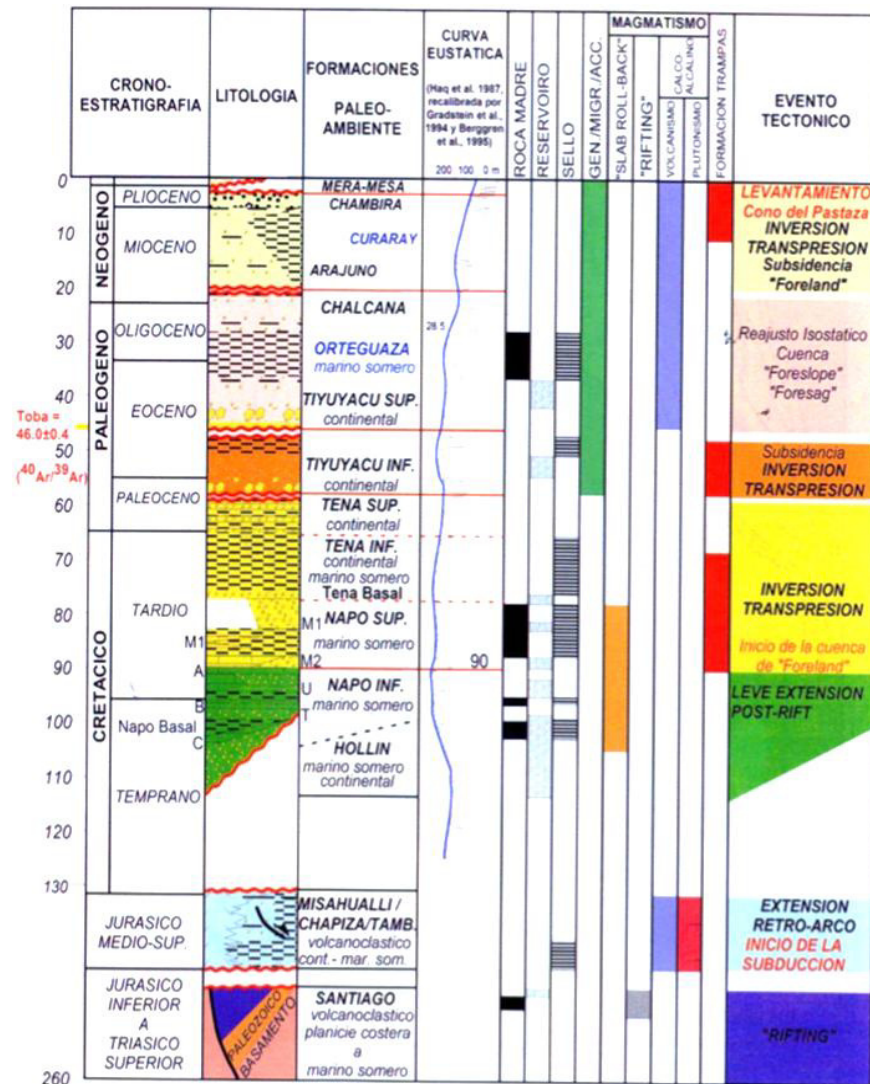


Figura 1.2 Columna Estratigráfica Generalizada de la Cuenca Oriente.  
Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo"

### 1.3.3 Características de la Arenisca U

El espesor total de la Arenisca U (Figura 1.3) varía de 22 a 86 pies a través del campo. Estas áreas tienen las acumulaciones más gruesas de barras y canales de arena de marea. Entre las características generales están: arenisca cuarzosa, con feldespatos y fragmentos líticos en menor proporción. Como minerales accesorios están el circón, la moscovita y la glauconita. La matriz predominante es caolinítica y de cemento silíceo. La porosidad en su mayoría es intergranular con un porcentaje promedio del 17% y ocasionalmente es intragranular con disolución.

La Arenisca "U" Superior está constituida por una arenisca cuarzosa, blanca, translúcida, transparente, grano fino a muy fino, ocasionalmente grano fino a medio, matriz calcárea, cemento silicio e inclusiones de glauconita y pirita.

La Arenisca "U" Inferior está constituida por una arenisca cuarzosa, marrón, café clara, friable, grano fino a muy fino, ocasionalmente grano medio, selección regular, cemento silíceo, buena saturación de hidrocarburos, fluorescencia amarillo-blanquecino, corte lento, residuo café claro.

La Arenisca U Inferior es de mayor desarrollo, se encuentra más limpia y continua a lo largo del campo mientras que la Arenisca U Superior no presenta tal continuidad. La Arenisca U Superior tiene intercalaciones de lutitas, calizas y limolitas arcillosas y no es tan desarrollada como la Arenisca U Inferior.

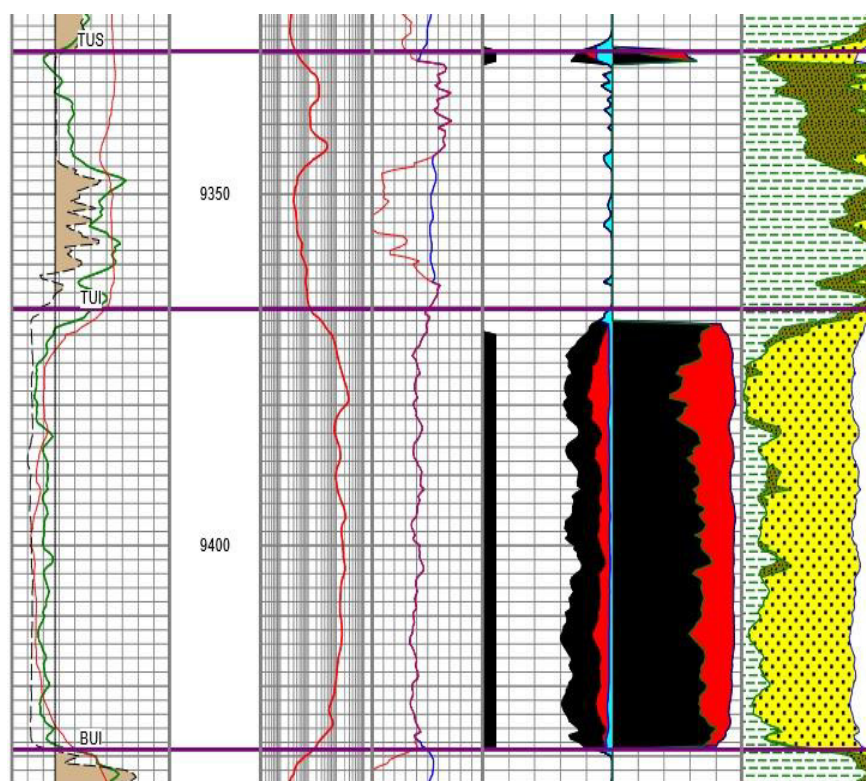


Figura 1.3 Registro Eléctrico del Pozo Sacha 028.  
en donde se observa el Registro GR de la Arenisca U,  
mostrando una buena calidad de arena en la u inferior.

**Fuente:** Cortesía Río Napo Cem



# **CAPÍTULO 2**

## **2. CARÁCTERÍSTICAS GEOLÓGICAS ASOCIADAS A LA ARENISCA U.**

### **2.1 Medios Continentales**

Debido a que son erosionados fácilmente, la conservación del registro de estos medios es casi nula.

#### **2.1.1 Medios de zonas áridas**

Son depósitos que se originan en un relieve elevado terminando en una zona llana, que puede ser una playa o una llanura de inundación. Los depósitos más típicos de estas regiones son los abanicos aluviales.

Para que se formen es necesaria la existencia de una zona topográfica elevada, adyacente a una región de relieve llano, son depositados por canales; derivando cada uno de un área fuente, cuya corriente transporta el material resultante de la erosión de esa zona. El depósito del material tiene forma de cono.

Lateralmente los sedimentos pasan a depósito de playa, de llanura de inundación o lacustres (Figura 2.1).

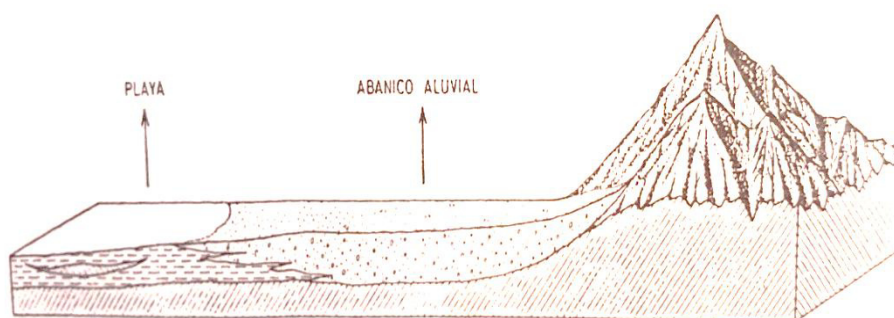


Figura 2.1 Relieve de un abanico aluvial en contacto con los sedimentos de playa.

**Fuente:** Libro "Estratigrafía".

**Autor:** Inmaculada Corrales et al.

## 2.2 Medios fluviales

Estos medios pueden dividirse en tres grupos dependiendo del curso de agua de su trazado: rectos, la sinuosidad el cauce en épocas de venida es despreciable, son los menos frecuentes y se depositan pequeñas cantidades de sedimentos; ramificados o anastomosados, debido a que

se originan series sucesivas de divisiones y reuniones de la corriente, se originan canales que bordean islas aluviales como las llanuras aluviales glaciales; meandriformes, cuando la corriente presenta inflexiones a lo largo de su dirección.

### 2.2.1 Depósitos de barra de canal

Originados por los ríos anastomosados (Figura 2.2). La granulometría varía si son de corrientes montañosas, el material es grueso; por el contrario los tramos en los cursos bajos de ríos transportan sedimentos finos. Los componentes más gruesos (arena y grava) de la carga de una corriente originan barras, depositándose de manera transitoria. Estas barras se pueden desplazar originando estratificación granular tabular.

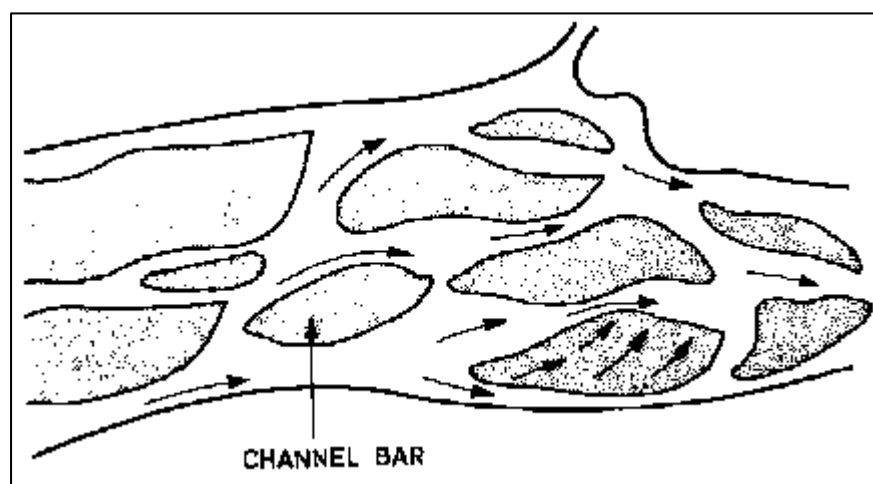


Figura 2.2 Barras de Canal Orientadas hacia la Dirección de la Corriente de Agua.  
**Fuente:** Imagen Tomada de Internet.

## 2.3 Medios de Transición

### 2.3.1 Medios Costeros

Fuertemente influenciada por las transgresiones y regresiones, la costa es la zona limítrofe entre el continente y el mar (Figura 2.3).

En esta área de transición los materiales que se depositan son arenosos, formando la franja de la línea de costa, dando lugar a islas barreras, y hacia el mar los materiales lutíticos de plataforma.

En el continente los ambientes y materiales depositados que están siendo sustituidos, varían según si existan islas barreras o no.

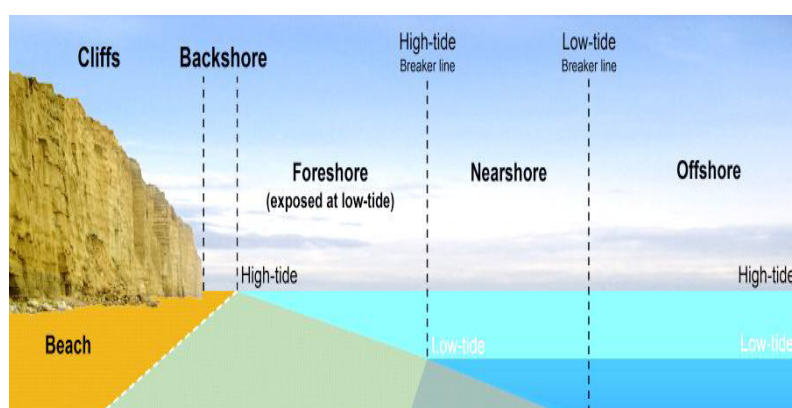


Figura 2.3 Ambientes Sedimentarios de una Zona Costera.  
**Fuente:** Imagen Tomada de Internet.

### **2.3.1.1 Subambientes en la zona costera**

La sedimentación en las playas está limitada por la acción del oleaje. La línea más alta alcanzada por las olas representa el límite superior, separando los depósitos de playa de las dunas costeras. El límite inferior se encuentra mar adentro, en el punto en que oleaje deja de tener acción directa en el fondo.

Dentro de una playa ideal se pueden distinguir tres ambientes sedimentarios distintos, caracterizados por presentar un tipo de material asociado a unas estructuras sedimentarias primarias determinadas.

#### **Backshore**

Es el subambiente más proximal o que limita con el cordón de dunas, cuyo límite inferior lo constituye el nivel de marea alta. Los materiales que se depositan en esta zona son fundamentalmente arenosos. Es difícil de caracterizar por sí solo, para ello debe conocerse la sucesión de ambientes en sentido vertical y lateral, debido a que los materiales transportados por el mar son retrabajados por el viento, encontrándose diferentes tipos de estructuras sedimentarias.

**Foreshore**

Es la parte considerada como playa propiamente dicha, con sedimentos y morfología de fondo distinto corresponde al intramareal; sus límites superior e inferior lo constituyen el de marea alta y el de marea baja. Los materiales que se depositan en esta zona son arenosos, aunque la clasificación es menor a la que presentan las arenas del backshore y de las dunas costeras.

**Shoreface**

Es la parte más distal de la playa, siempre bajo las aguas, que se halla delimitada entre el nivel de marea baja y el punto donde el oleaje deja de ejercer una acción sobre el fondo. Los sedimentos son aun predominantemente arenosos mientras en la plataforma son arcillosos.

**Offshore**

Área donde se desarrolla la sedimentación de los materiales de plataforma.

**2.3.1.2 Ciclos de playas**

En una serie regresiva (Figura 2.4), sería de la siguiente manera: en la parte alta del ciclo existirán depósitos de dunas eólicas costeras y que marcarán el fin del ciclo. Luego, sucesivamente, la serie estará formada

por depósitos de backshore, foreshore y shoreface. El ciclo comenzará sobre un sustrato formado por sedimentos de plataforma continental.

Si la serie es transgresiva, la distribución de los medios es a la inversa, siendo los ciclos aún más incompletos.

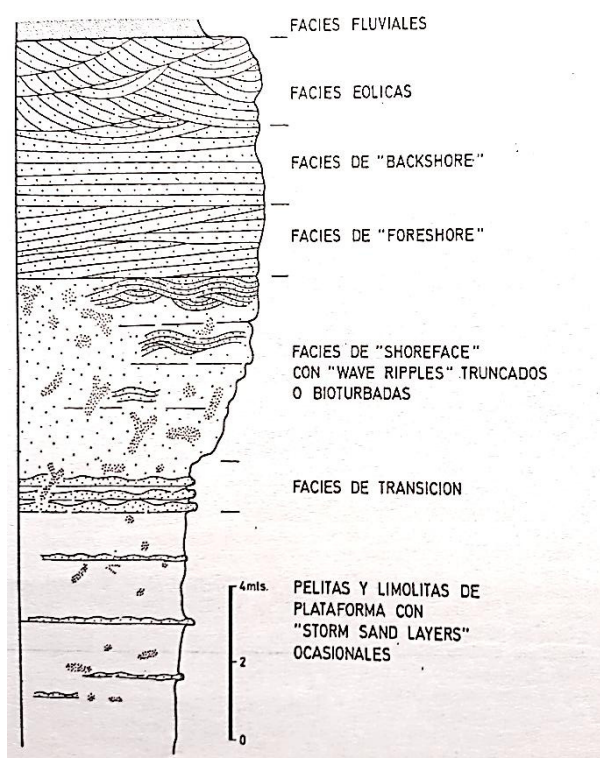


Figura 2.4 Columna Estratigráfica de un Ciclo Regresivo de Playas  
Fuente: Imagen Tomada de Internet.

## 2.4 Estuarios

Lateralmente el medio estuarino limita con medios de mareas, río mareal y medio litoral, shoreface. Dentro del estuario se pueden distinguir las zonas de canal, en conexión continua al medio fluvial, zonas de superficie mareales con predominio de materiales finos y gran actividad de procesos biológicos, y bancos o superficies arenosas que aparecen en transición lateral (Figura 2.5).

Las facies de canal y transición al río mareal se caracterizan por la presencia de sets de estratificación cruzada de escala pequeña y grande, sin que predomine ninguna de ellas y con bimodalidad en dirección.

Sobre la superficie mareal, lo más característico del medio estuarino es la estratificación lenticular y flaser, lentejones arenosos intercalados entre limos y arcillas que pueden estar aislados y levemente interconectados.



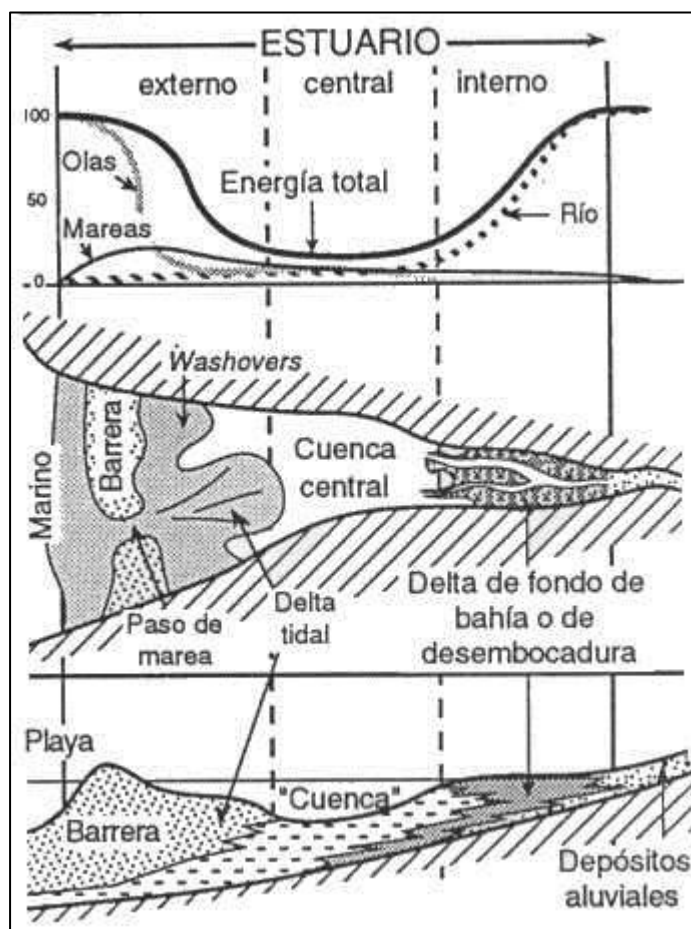


Figura 2.5 Medios Sedimentarios Asociados a un Estuario.  
**Fuente:** Imagen Tomada de Internet.

## 2.5 Transgresiones y Regresiones

La transgresión corresponde a una invasión del mar sobre una zona emergida (Figura 2.6); la línea de costa se desplaza entonces hacia tierra. En consecuencia las zonas que correspondían a un dominio litoral pasan ahora a tener características de un medio más profundo. En un

corte vertical aparecerán de la siguiente manera: sedimentos gruesos en la base, arenosos en la parte media y limo-arcillosos en la parte superior.

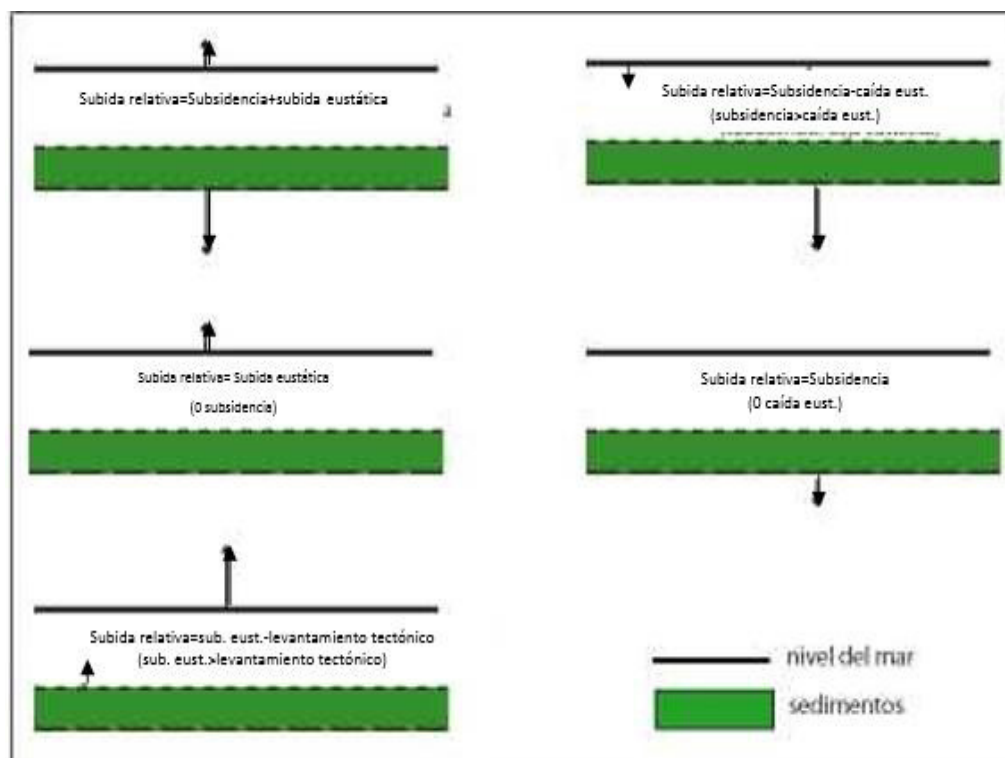


Figura 2.6 Escenarios de Subida del Nivel Relativo del Mar, es decir, de creación de Espacio Disponible para la Sedimentación ("Transgresión").

**Fuente:** Folleto "Introducción a la Estratigrafía Secuencial"

**Autor:** René Marroco.

Durante una regresión el desplazamiento de la línea de costa es hacia el mar, cuando este se retira como consecuencia de un descenso relativo de su nivel (Figura 2.7). En corte vertical sería lo inverso a la transgresión.

Los fenómenos de transgresión y regresión se manifiestan de una manera más neta en zonas marginales de las cuencas sedimentarias; allí una variación mínima del nivel del mar queda reflejada en un desplazamiento de los medios sedimentarios y, por consiguiente, de los depósitos que en dichos medios se acumulan.

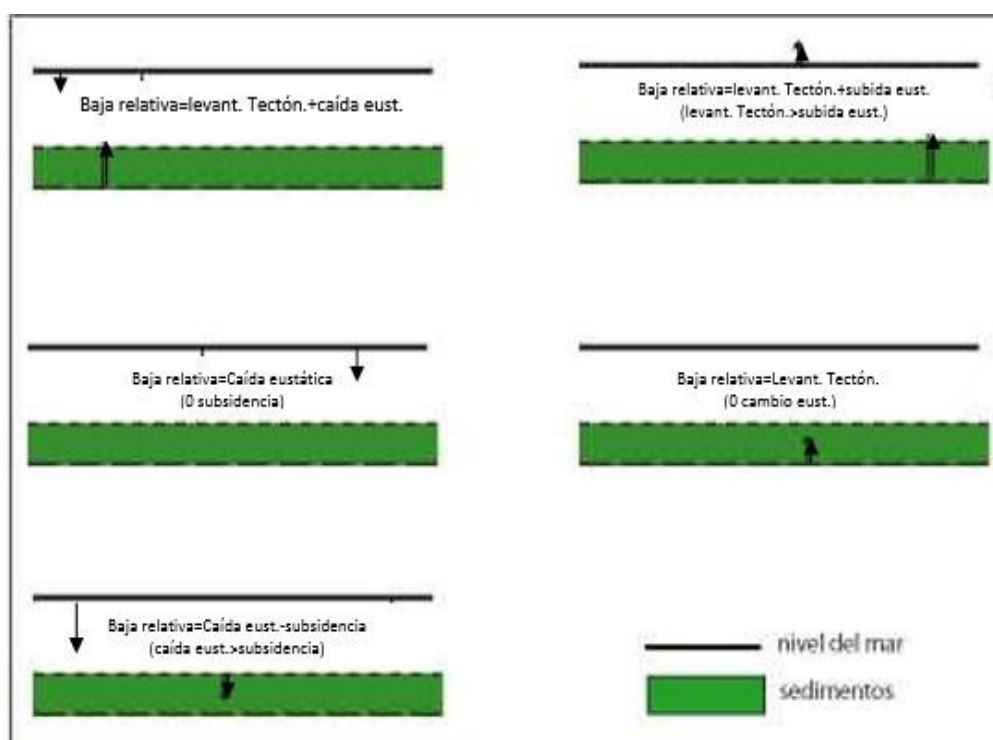


Figura 2.7 Escenarios de Baja Relativa del Mar es decir destrucción de espacio disponible ("regresión").  
**Fuente:** Libro "Introducción a la Estratigrafía Secuencial"  
**Autor:** René Marroco.

### **2.5.1 Variaciones del nivel del mar**

Las causas que motivan cambios en el nivel del mar pueden ser de dos tipos: tectónicas y eustáticas. Las primeras producen, en su mayoría, cambios relativos en el nivel del mar, habiendo poca o ninguna variación en el volumen de agua del océano; las segundas originan modificaciones en el volumen del agua, a las que van unidas los consiguientes cambios en el nivel de la misma.

Las variaciones eustáticas pueden ser debidas a distintos fenómenos geológicos: glaciaciones (disminución del volumen de agua en la cuenca), vulcanismo postorogénico (aumento de agua), ciclo morfogénético normal (etapa limnócrata).

### **2.5.2 Cambios cíclicos del nivel del mar**

Se han definido cinco órdenes de ciclos de cambios de nivel del mar con un rango de periodicidad que va de cientos a millones de años.

La definición de ciclo es algo subjetiva ya que algunos de estos ciclos no tiene realmente una periodicidad definida.

### **2.5.2.1 Ciclos de primer orden**

Estos ciclos se encuentran en un rango de duración entre 200 y 400 millones de años y pueden ser reconocidos en el Fanerozoico. Son ampliamente interpretados por estar relacionados a fenómenos de acreción subsidencia y separación de los supercontinentes.

Cuando los continentes se reúnen, la cantidad de dorsales centro oceánicas es mínima y el volumen de cuenca oceánica es máximo. Esto da como resultado una caída eustática global del nivel del mar. Estas condiciones son revertidas en eventos de separación de supercontinentes donde aparecen nuevas dorsales centro oceánicas que desplazan el agua hacia los márgenes continentales.

### **2.5.2.2 Ciclos de segundo y tercer orden**

Los ciclos de segundo orden tienen un lapso de duración de 10 a 100 millones de años. Estos ciclos han podido ser correlacionados entre cuatro diferentes continentes sugiriendo que hay un control del nivel del mar global. Estos ciclos de segundo orden son el reflejo de cambios volumétricos de las dorsales oceánicas.

Los ciclos de tercer orden tienen una duración entre 1 y 10 millones de años, pero por lo general tiene una duración menor a 3 millones. Los límites de estos ciclos pueden tener espaciamientos que dificultan la correlación, el cálculo de su edad y la sincronía con otros ciclos de tercer orden.

### **2.5.2.3 Ciclos de cuarto y quinto orden**

Estos ciclos son muy documentados en diferentes partes del Fanerozoico, en ambientes marino someros y en sedimentos pelágicos. Estos cambios cíclicos son mejor explicados por cambios en el clima debido a perturbaciones en el eje de rotación de la Tierra o su órbita. Esta perturbación astronómica se conoce como los ciclos de Milankovitch. Se explica que la manera más fácil de producir cambios en el nivel del mar a escala de cuarto y quinto orden es por la alternante acumulación y derretimiento de las capas de hielo continentales.

## **2.5.3 Criterios para reconocer transgresiones y regresiones**

### **2.5.3.1 Reconocimiento de transgresiones**

En la parte basal, los sedimentos son de grano grueso y están bien calibrados; sobre estos aparecen alternancias de limos y arenas y

terminan con depósitos de granos muy finos. En ocasiones los sedimentos gruesos pasan a carbonatos constituidos por la acumulación de sedimentos fósiles.

También presentan características que indican una sedimentación lenta, tales como nódulos de fosfato y glauconita.

La acción ejercida por la erosión en las transgresiones y regresiones, queda manifestada como una discontinuidad estratigráfica, que puede ser del tipo de una disconformidad o de una discordancia. Por lo tanto, la presencia de uno de estos rasgos puede indicar el inicio de una serie transgresiva.

### **2.5.3.2 Reconocimiento de regresiones**

Los sedimentos van presentando facies progresivamente más someras, finalizando la regresión con depósitos de playa o lagoon, o incluso con depósitos continentales.

Los criterios físicos: materiales muy finos en los términos basales de la serie, correspondiente a sedimentación más profunda, por debajo de la base de las olas; presentando una bioturbación muy intensa. A medida que se asciende en la sucesión el tamaño de grano se va haciendo

paulatinamente más grueso hasta llegar a los depósitos de playa; a partir de aquí el sedimento vuelve a ser más fino, por corresponder a medios tales como dunas, llanuras de marea, etc.

## **2.6 Cortejos Sedimentarios**

El concepto de cortejos sedimentarios fue creado para definir un vínculo de sistemas depositacionales contemporáneos y la subdivisión de una secuencia. Una de las descripciones más recientes de cortejos sedimentarios la hizo Galloway (2004) quien dice “Son unidades estratigráficas genéticas que incorporan depósitos estratificados dentro de un sistema de sedimentos dispersos sincronos”

Un sistema de sedimentos dispersos describe la manera que los sedimentos son distribuidos dentro de una cuenca sedimentaria, son relativamente estables durante la depositación de cada cortejo sedimentario en particular.

Cada cortejo sedimentario es definido por un patrón específico de depositación, muy cercanamente asociado a un cambio de la línea de costa (regresión forzada, regresión normal o transgresión).



**Secuencias tipo 1 (Figura 2.8)**

Se forma durante un estado de una rápida caída eustática del nivel del mar, cuando la velocidad de caída del mar es mayor a la de subsidencia en el borde de la plataforma.

**Secuencias tipo 2**

Se forma durante estados de caídas eustáticas lentas del nivel del mar, cuando la velocidad de caída del mar es menor que la de subsidencia en la línea de costa, y como el resultado de una exposición a la erosión aérea menor en la plataforma continental.

En este escenario, la caída relativa del nivel del mar en la línea de costa es contemporánea con una elevación relativa en el borde de plataforma.

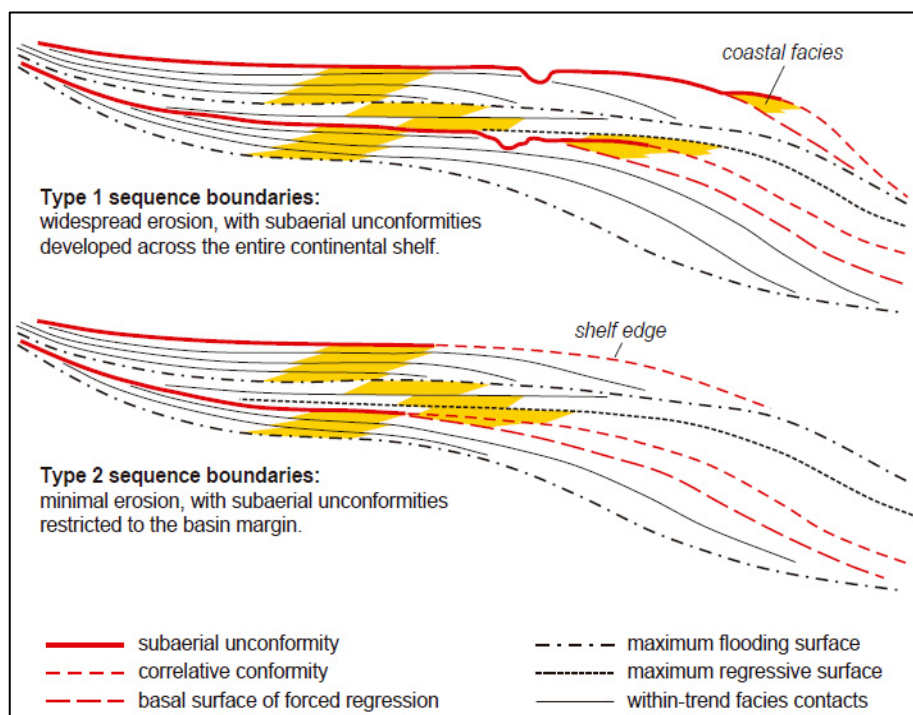


Figura 2.8 Esquema de las Secuencias Tipo 1 y 2.  
**Fuente:** Folleto "introducción a la Estratigrafía secuencial"  
**Autor:** René Marroco.

### 2.6.1 Cortejo de bajo nivel

El cortejo de bajo nivel incluye los sedimentos más gruesos de las partes marinas y no marinas de las series, es decir la parte inferior de las series granodecrescentes en ambiente continental, y la parte superior de la serie granocreciente en ambiente marino somero.

Los depósitos del cortejo de bajo nivel consisten en sedimentos no-marinos (relleno de valles incisos, canales) y en depósitos marinos y costeros. El patrón de acumulación es progradante y, en el tope

agradante cuando la tasa de sedimentación equilibra la subida del nivel de base.

Por debajo de la zona de mayor actividad de las olas en período de buen tiempo, la extensión de las facies de plataforma puede ser limitada debido a la proximidad potencial de la línea de costa con el borde de la plataforma al final de la regresión forzada. En este caso, se pasa directamente de las facies infra-tidales a las de talud (esencialmente flujos de gravedad).

El Low System Track (LST) está limitado en su tope por la Superficie de Máxima Regresión (MRS) suprayacida por los sedimentos del cortejo transgresivo. En las partes distales profundas del sistema, el abanico sedimentario profundo está alimentado por flujos de gravedad de baja densidad procedentes de la desestabilización de parte de los sedimentos del prisma progradante de frente de playa (o de frente de delta en el caso de una desembocadura). (Figura 2.9)

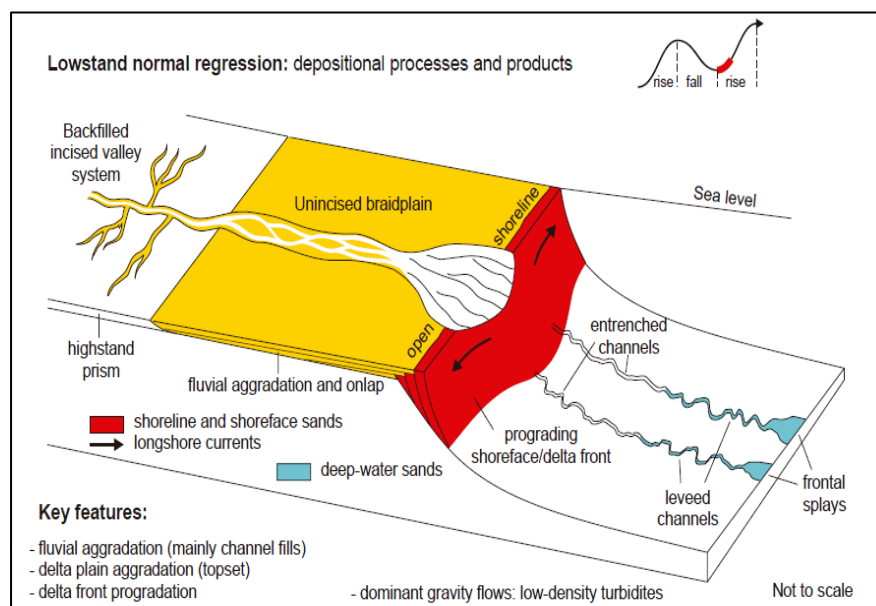


Figura 2.9 Cortejo de Bajo Nivel debido a la Regresión.  
**Fuente:** Folleto "Introducción a la Estratigrafía Secuencial"  
**Autor:** Renéé Marroco.

### 2.6.2 Cortejo transgresivo

El cortejo transgresivo comienza a depositarse cuando la velocidad de subida del nivel de base sobrepasa la tasa de sedimentación. Así que, en su base, este cortejo tiene como límite la superficie de máximo de regresión (MRS) y, en su tope, la superficie de máximo de inundación (MFS).

El cortejo transgresivo se identifica por su patrón de acumulación retrogradante (es decir granodecreciente) tanto en las series marinas como en las continentales. La parte marina del cortejo transgresivo se

desarrolla en primer lugar en las zonas de poca profundidad, cerca de la línea de costa.

Son los depósitos que se acumulan en la zona de solapamiento costero (onlap) en el shoreface. Más hacia el offshore se encuentran las series condensadas correlativas de los depósitos del shoreface, los depósitos gravitacionales y los sedimentos pelágicos.

La parte costera del cortejo transgresivo está compuesto por depósitos de playa, facies estuarinas y sistemas de islas barreras. La constitución y la preservación de las facies estuarinas depende de varios factores: la tasa de subida del nivel de base, de la profundidad de la erosión fluvial durante la etapa de caída del nivel de base, del régimen de los vientos, de la erosión de las olas, de la gradiente topográfica de la línea de costa. La agradación costera se favorece de una fuerte tasa de subida del nivel de base, de poca superficie erosiva (ravinement surface) y de una baja gradiente topográfica (lo que se da en una costa plana y abierta). En cambio, una fuerte gradiente topográfica induce una erosión costera en relación con una fuerte energía fluvial y una superficie erosiva alta debida a la acción de las olas. Una fuerte gradiente topográfica no será favorable al emplazamiento de un estuario (Figura 2.10).

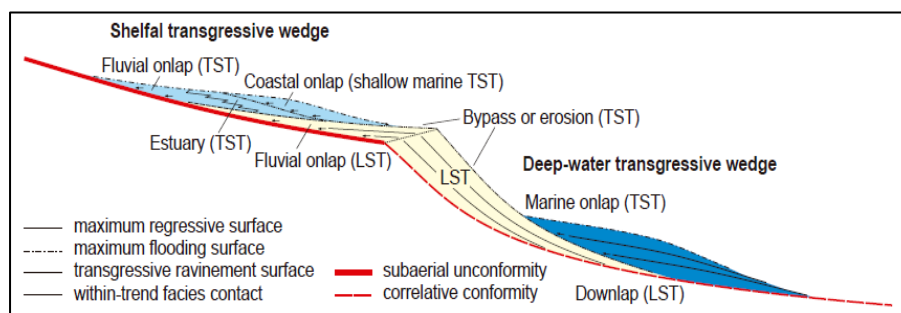


Figura 2.10 Expresión Estratigráfica de un Estrato Transgresivo.

**Fuente:** Folleto "Introducción a la Estratigrafía Secuencial".

**Autor:** René Marroco.

### 2.6.3 Cortejo de alto nivel

El cortejo de alto nivel tiene como límites, en su base la superficie de máximo de inundación y al tope una superficie compuesta que incluye la discontinuidad subaérea, la superficie regresiva de erosión marina y la superficie basal de regresión forzada.

Este cortejo representa la etapa tardía de la subida del nivel de base, cuando la tasa de subida del nivel es inferior a la tasa de sedimentación, ocasionando una regresión normal de la línea de costa. En la parte continental del sistema, se produce agradación fluvial con una tasa más importante en la proximidad de la línea de costa provocando una disminución correlativa de la pendiente topográfica. Por esta razón, la parte no marina del cortejo de alto nivel registra una disminución de la energía fluvial y, por consiguiente, una organización granodecreciente de las acumulaciones sedimentarias.

En su parte marina, el cortejo de alto nivel se caracteriza por una organización granocreciente en relación con la migración de las facies hacia la cuenca. Las facies son de regresión normal con un patrón levemente progradante y/o agradante, según las variaciones diferenciales de las tasas de sedimentación y de creación de espacio.

En ambiente sílico-clástico, el Hight System Track (HST) comprende deltas con geometrías en topsets. Cuando la plataforma marina presenta condiciones para fabricar carbonatos, el HST es una plataforma carbonatada. La parte profunda de la cuenca (plataforma y talud) recibe esencialmente una sedimentación de grano fino pelágica o hemipelágica.

Los sedimentos continentales y los de mar somero en la etapa de alto nivel de base tienen poca probabilidad de conservarse debido a la erosión subaérea y marina de la etapa siguiente de caída del nivel de base (Figura 2.11).

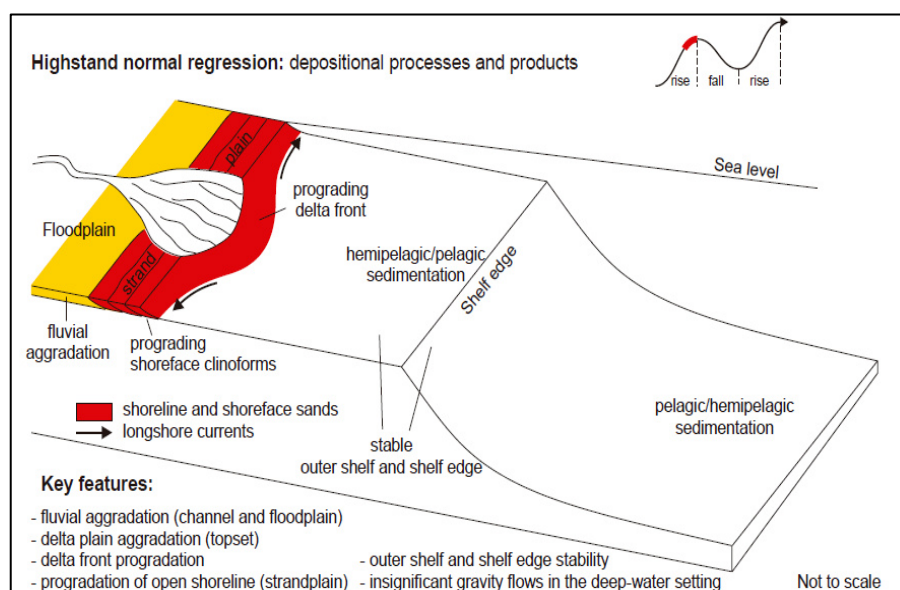


Figura 2.11 Proceso depositacional producto de un Cortejo de Alto Nivel.

**Fuente:** Folleto "Introducción A La Estratigrafía Secuencial".

**Autor:** René Marroco.

#### 2.6.4 Cortejo regresivo

El cortejo regresivo es un cuerpo sedimentario constituido por los cortejos de Alto nivel (HST), de Caída del Nivel de Base (FSST) y de Bajo Nivel (LST). El cortejo regresivo se usa cuando hay imposibilidad de diferenciar los diferentes cortejos regresivos en los documentos de subsuelo. El RST está limitado, en su base, por la superficie de máximo de inundación y, al tope, por la superficie de máximo de regresión; el RST se caracteriza por un patrón de acumulación progradante, tanto en sus partes continentales como marinas.



Representa bajo forma de un diagrama de Wheeler la organización de los depósitos durante un ciclo regresivo- transgresivo en el caso de una sedimentación detrítica. Aparecen los cortejos con las superficies que los limitan, los patrones de acumulación (progradante, retrogradante, agradante). La figura 2.12 muestra también la organización granulométrica de los cuerpos sedimentarios, en la plataforma y en la cuenca.

Vale notar que durante la sedimentación del cortejo de bajo nivel (LST), es decir durante la etapa de regresión normal, hay una diferencia de evolución granulométrica entre la plataforma (granocreciente) y la zona de talud/cuenca (granodecreciente): los materiales gruesos y arenosos se quedan atrapados en los depósitos agradantes fluviales y costeros; llegando a los abanicos profundos turbiditas lodosas de baja densidad.

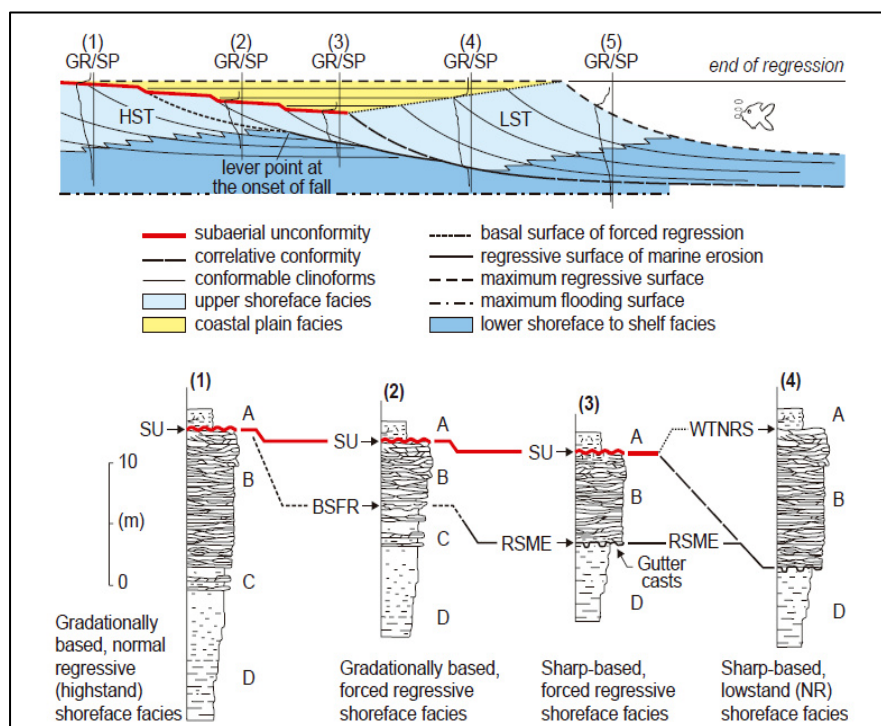


Figura 2.12 Esquema de un Cortejo Regresivo en un Ambiente Marino Poco Profundo Dominado por Olas.

**Fuente:** Folleto "Introducción a la Estratigrafía Secuencial".

**Autor:** René Marroco.

## 2.7 Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Arenisca U

La sección sedimentaria Hollín, Napo y Basal Tena posee características bien definidas en un modelo estratigráfico donde se puede observar variaciones bruscas de la línea de costa, cambios verticales y laterales de facies a lo largo de la cuenca que interrumpen la imperante sedimentación marina somera de baja energía.

Las variaciones del nivel del mar controlan el espacio disponible para la acomodación de sedimentos con lo cual se controla de forma regional la distribución de las facies sedimentarias que puedan darse dentro de la cuenca (Zailtin 1994). Cuando se produce una progradación de facies sedimentarias fluviales y de playa sobre la plataforma marina causada por la caída de nivel del mar se produce una regresión forzada.

### **2.7.1 Ciclo sedimentario I (Aptiano Superior-Albiano Superior)**

Después de un periodo de erosión de la serie jurásica y paleozoica en la Cuenca Oriente se da la depositación de sedimentos fluviales que correspondieron a la Fm. Hollín principal los cuales rellenaron los valles incisos formados durante esta erosión. La Fm. Hollín está caracterizada por una sucesión de depósitos de ríos entrelazados progradantes en planicies aluviales. Este sistema pasa progresivamente a ambientes distales de planicie aluvial costera tipo llanura de inundación. Posterior a esto se observan ambientes detríticos de baja energía producidos por los efectos de una transgresión (TST) depositándose la Fm. Hollín superior.

La superficie de máxima inundación (MFS) ocurre durante la depositación de la lutita basal Napo Inferior (Figura 2.13).

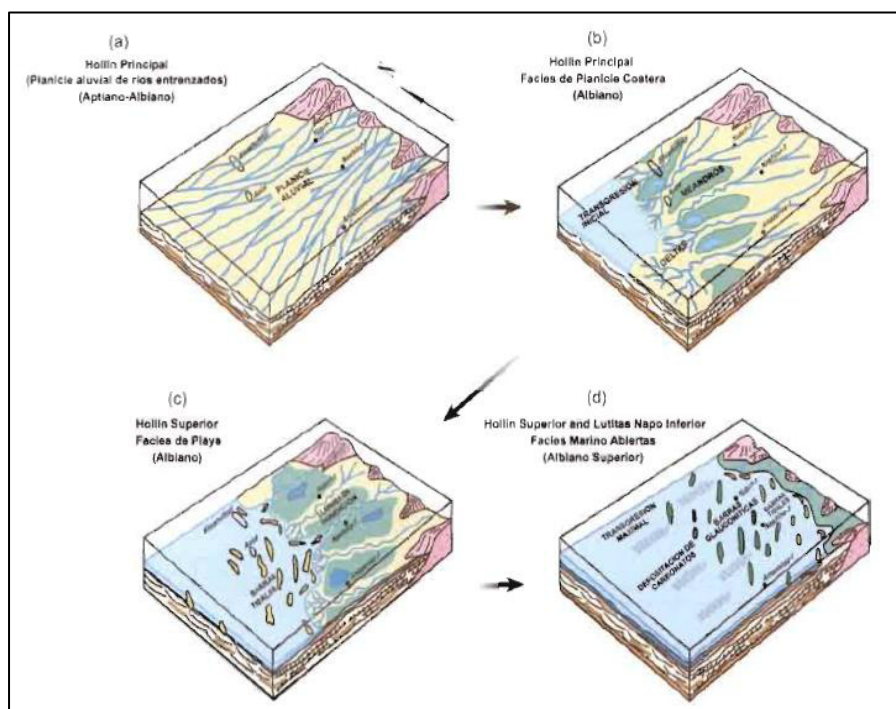


Figura 2.13 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario I.  
(Modificado de White 1995)

**Fuente:** Libro "La Cuenca Oriente: Geología Y Petróleo"

**Autores:** Patrice Baby et al.

## 2.7.2 Ciclo sedimentario II (Albiano Superior-Cenomaniano Medio)

Inicialmente se produce una caída del nivel del mar donde se erosiona la parte superior del Ciclo I por lo tanto se generan drenajes erosivos que forman una red de valles incisos subsecuentemente rellenados por las arenisca T principal durante el inicio del ciclo transgresivo (LST). El ambiente aquí se caracteriza por ser estuarino con influencia de mareas donde los depósitos transgresivos (TST) se depositaron formando la arenisca T superior y la caliza B. Finalmente este ciclo termina con la

deposición de las lutitas U asociadas a la Máxima Inundación (MFS) (Figura 2.14).

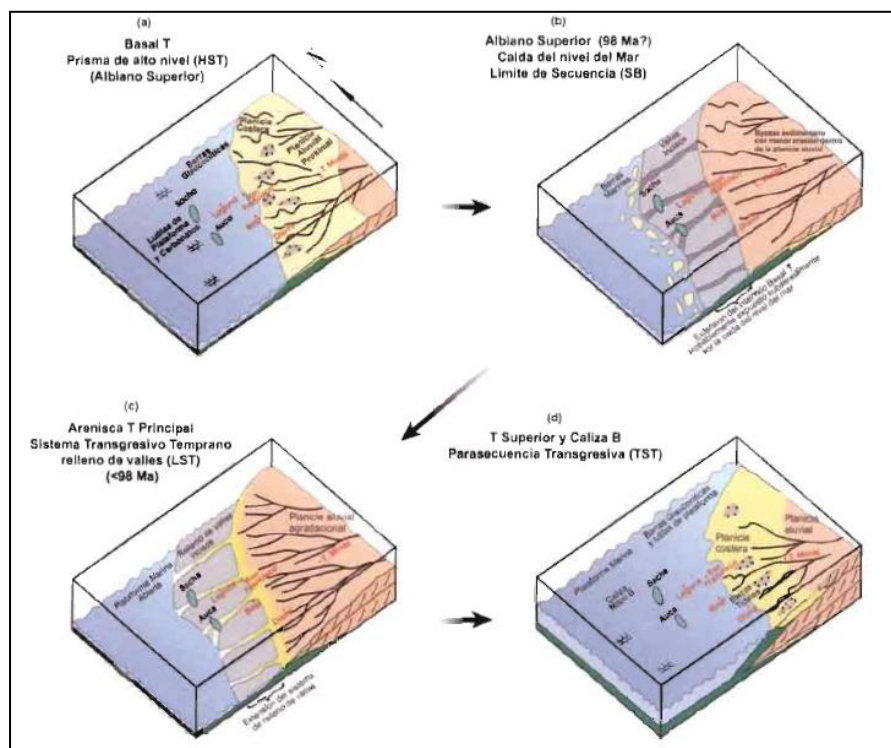


Figura 2.14 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario II.  
(Modificado de White 1995)

**Fuente:** Libro "La Cuenca Oriente: Geología Y Petróleo"  
**Autores:** Patrice Baby et al.

### 2.7.3 Ciclo sedimentario III (Cenomaniano Inferior a Medio – Turoniano Inferior)

Se genera nuevamente una caída del nivel del mar donde se erosiona el tope de las calizas y lutitas U. Posterior a esto se deposita la arenisca U principal de manera similar a la arenisca T. Esta representa un relleno de

valles incisos depositados durante el inicio de la subida del nivel del mar (LTS). Estos valles incisos erosionados comienzan a transformarse en estuarios dominados por mareas los cuales son rellenados en retrogradación. Posterior a esto se comienza a depositar la arenisca U superior como continuación de este evento transgresivo (TST) compuesta generalmente de areniscas glauconíticas a calcáreas y lutitas de ambiente marino somero. Finalmente se deposita la caliza A al tope de este evento transgresivo (Figura 2.15).

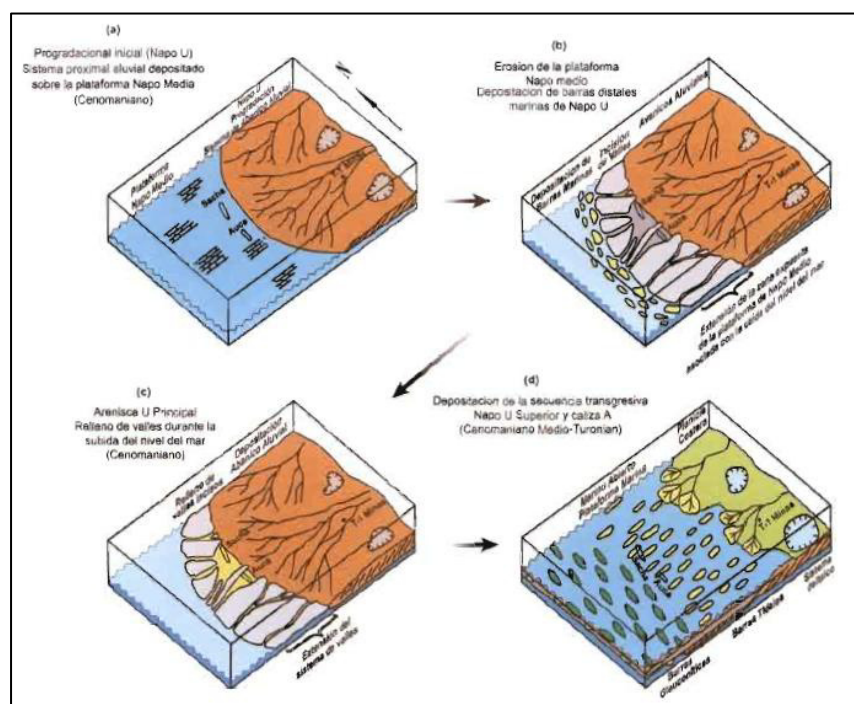


Figura 2.15 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario III. (Modificado de White 1995)

**Fuente:** Libro "La Cuenca Oriente: Geología Y Petróleo"  
**Autores:** Patrice Baby et al.

### 2.7.4 Ciclo sedimentario IV (Turoniano – Campaniano Inferior)

Aquí se deposita la arenisca M2 sobreyaciendo en onlap a la caliza A. Esta arenisca representa un evento de transgresión temprana de tipo fluvial estuarino generado después de una caída del nivel del mar. Las calizas M1 y M2 son generadas por intervalos transgresivos carbonatados en la plataforma marina (TST). Al tope de este ciclo se deposita la lutita Napo superior la cual está asociada a la superficie de máxima inundación (Figura 2.16).

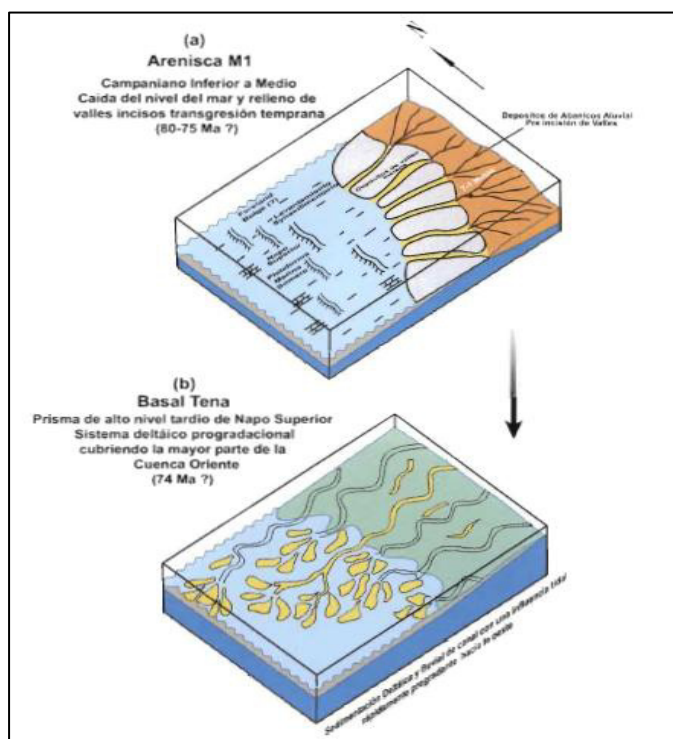


Figura 2.16 Esquema Paleo-Geográfico del Ciclo Sedimentario III.  
(Modificado de White 1995)

**Fuente:** Libro "La Cuenca Oriente: Geología Y Petróleo"  
**Autores:** Patrice Baby et al.

### **2.7.5 Ciclo sedimentario V (Campaniano – Maastrichtiano Inferior)**

Este ciclo sedimentario, al igual que el ciclo IV se encuentra restringido a la parte este de la Cuenca Oriente. Las areniscas M1 son facies de niveles clásticos muy similares a las otras areniscas de la Fm. Napo, estas corresponden a rellenos de paleo valles durante el inicio de un evento transgresivo. La arenisca Basal Tena se deposita en progradación sobre las areniscas M1 en la parte este y sobre las lutitas Napo en la parte oeste. Esta arenisca presenta una variedad de facies, fluvio-marinas, de playa y marina somera. En esta arenisca no se observan evidencias de erosión subareal. Se ha observado una mayoría de facies deltaicas.



# **CAPÍTULO 3**

## **3. MÉTODOS DE CORRELACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS EN UN REGISTRO ELÉCTRICO DE POZOS**

### **3.1 Métodos de correlación**

#### **3.1.1 Estratos marcadores**

La respuesta de un registro de un estrato distintivo o series de estratos, pueden ser usados como marcadores incluso si la litología u origen del estrato no es conocido del todo. Estratos distintos lateralmente, pero pertenecientes a un mismo grupo son resultado de transgresiones, regresiones o procesos erosivos que redistribuyen los sedimentos.

Estratos marcadores que pueden ser mapeados regionalmente podrían estar relacionados o incluidos a importantes superficies aloestratigráficas como por ejemplo secciones condensas que representan superficies de omisión, alta concentración de fósiles planctónicos y bentónicos, también conocidas como hard ground.

### **3.1.2 Coincidencia de patrones**

Esta técnica involucra el reconocimiento de patrones de distintos registros de cualquier origen. La correlación de estos patrones puede representar sucesión de facies verticales, facies sobrepuestas o unidades discordantes.

Haciendo coincidir estos patrones en las bases de las curvas de los registros se realiza correlaciones en intervalos superiores a 10 pies. Las coincidencias de los patrones pueden permitir correlacionar incluso donde haya ocurrido cambios laterales de facies, variaciones de litologías, facies y espesores. Los registros de dos o más pozos pueden desplazarse buscando coincidir una de estas curvas patrón lo mejor posible.

### **3.1.3 Técnicas de corte**

Cuando ninguno de los anteriores métodos dio resultado, se puede realizar subdivisiones arbitrariamente de un intervalo a estudiarse tratando en unidades con espesores proporcionales a dicho intervalo. Esta división en intervalos no genera verdaderas correlaciones, es solo una manera de dividir una sección que no pudo ser subdividida de otra manera.

En este método se asume implícitamente que las líneas de tiempo a través de este intervalo son horizontales y en zonas donde esta suposición es invalida, este método puede dar errores.

Este espesor debe ser elegido para minimizar complicaciones; por ejemplo, en un área donde la arena tiene un espesor de 30 pies, realizar cortes o subdivisiones menores a 30 pies podría no producir resultados interpretables.

## **3.2 Parámetros en un registro eléctrico de pozos**

### **3.2.1 Potencial Espontáneo (SP)**

Este registro graba el potencial eléctrico entre el electrodo que se encuentra en la herramienta en el pozo y el electrodo que se encuentra en superficie. Este potencial existe debido a las diferencias electroquímicas entre el agua de formación y el lodo de perforación y se lo mide en mili voltios (mV). En secciones arcillosas, el SP responde con una línea máxima hacia la derecha y puede ser usado para definir la “línea base de arcilla”. Las deflexiones en la línea SP del registro indican zonas de rocas porosas y permeables que contiene fluido intersticial de salinidad diferente a la del lodo de perforación.

El SP puede ser un buen indicador de litología en áreas donde las areniscas son permeables y están saturadas de agua, sin embargo no logra diferenciar litología como areniscas cementadas de baja porosidad (Figura 3.1).

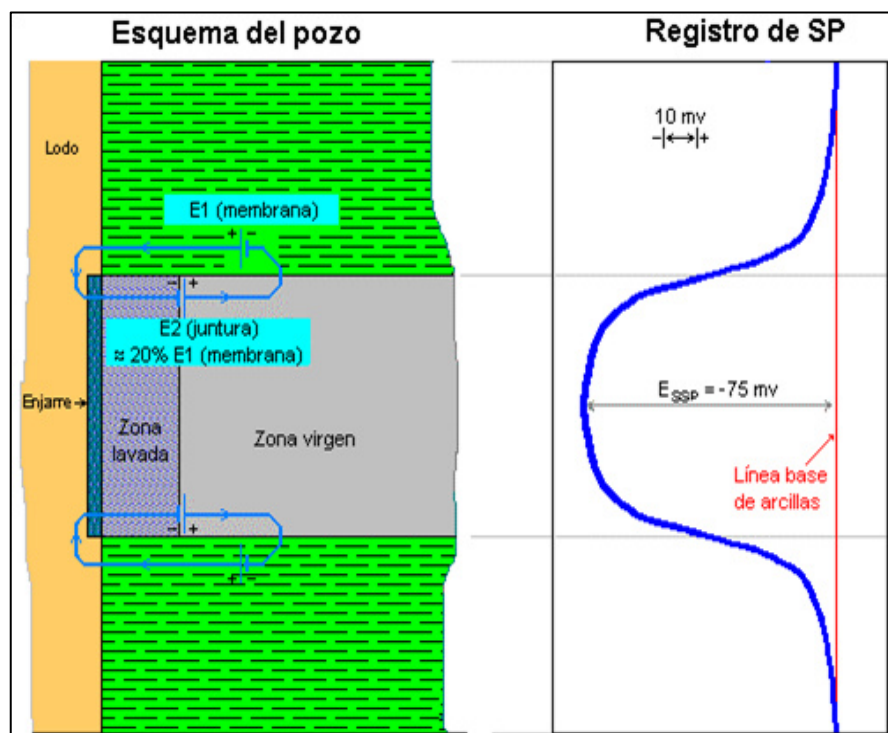


Figura 3.1 Representación De Un Registro Sp en donde se observa un cambio en la continuidad debido al tipo de litología.

Fuente: Foto tomada de internet.

### 3.2.2 Registro Resistivo (Rt)

Este registro mide la resistencia de los fluidos intersticiales al paso de la corriente eléctrica la cual es transmitida hacia la roca usando un electrodo o puede ser inducida magnéticamente. Se miden las resistividades a diferentes profundidades en la roca variando la longitud de la herramienta y el enfoque de la corriente inducida.

Los registros de resistividad son utilizados para evaluar los fluidos de las formaciones pero también pueden ser usados para la identificación de carbón (alta resistencia) y bentonitas (baja resistencia). En pozos donde se haya corrido pocos registros, el registro de resistividad puede fácilmente ayudar a identificar los topes y bases de las formaciones y realizar correlaciones entre pozos (Figura 3.2).

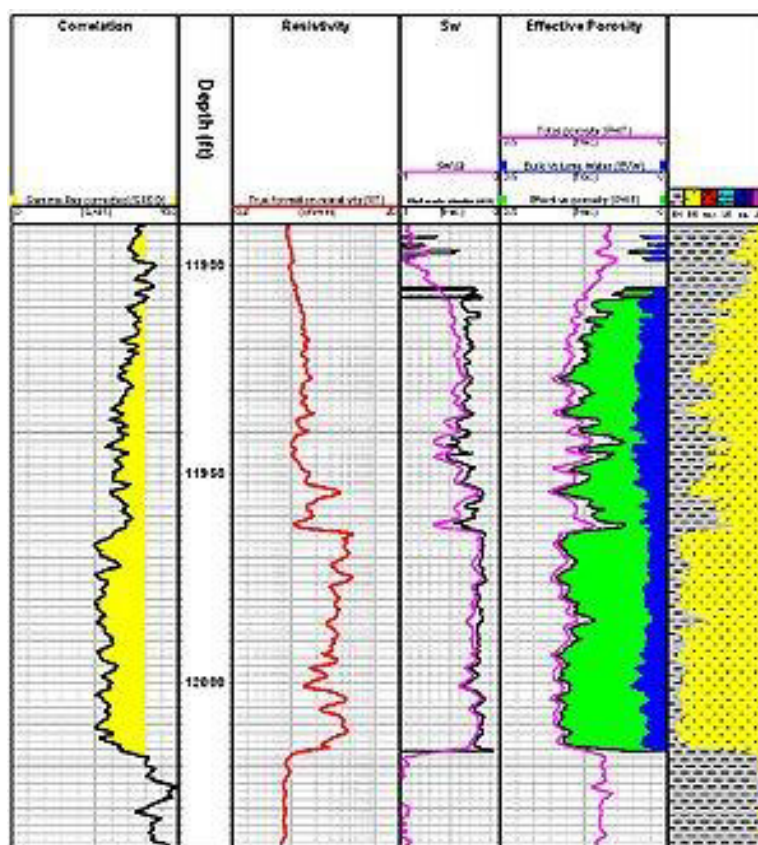


Figura 3.2 Representación de un Registro de Resistividad Rt (color rojo)

**Fuente:** Foto tomada de internet.

### 3.2.3 Registro Gamma Ray (GR)

Este registro mide la emisión natural de rayos gamma de los estratos de roca atravesados en la perforación del pozo. Se relaciona con la concentración de potasio (K), torio (Th) y uranio (U) presentes sobre todo en lutitas y algunas evaporitas. El potasio es el más común de estos elementos. En particular las lutitas producen más rayos gamma que otras rocas sedimentarias como areniscas, yeso, sal, carbón y dolomia; por esta razón el potasio radioactivo es un componente muy común en las lutitas. Debido a esta diferencia de radioactividad se puede diferenciar con esta herramienta entre lutitas y no-lutitas. La radiación gamma es generalmente registrada en unidades API. Cabe enfatizar que la lectura gamma ray no está en función del tamaño de grano o la concentración de carbonato, solo se basa en la proporción de elementos radioactivos que están relacionados a la concentración de lutitas.

La concentración de elementos radioactivos en lutitas se incrementa con la compactación. Los principales problemas con la interpretación del registro gamma ray son: la respuesta del registro puede ser afectada por arcillas en los poros de una arenisca, las lutitas ricas en illita son más radioactivas que las ricas en montmorillonita o cloritas, y arenas arcósicas (altas en feldespatos K) son más radioactivas que aquellas pobres en feldespatos (Figura 3.3).

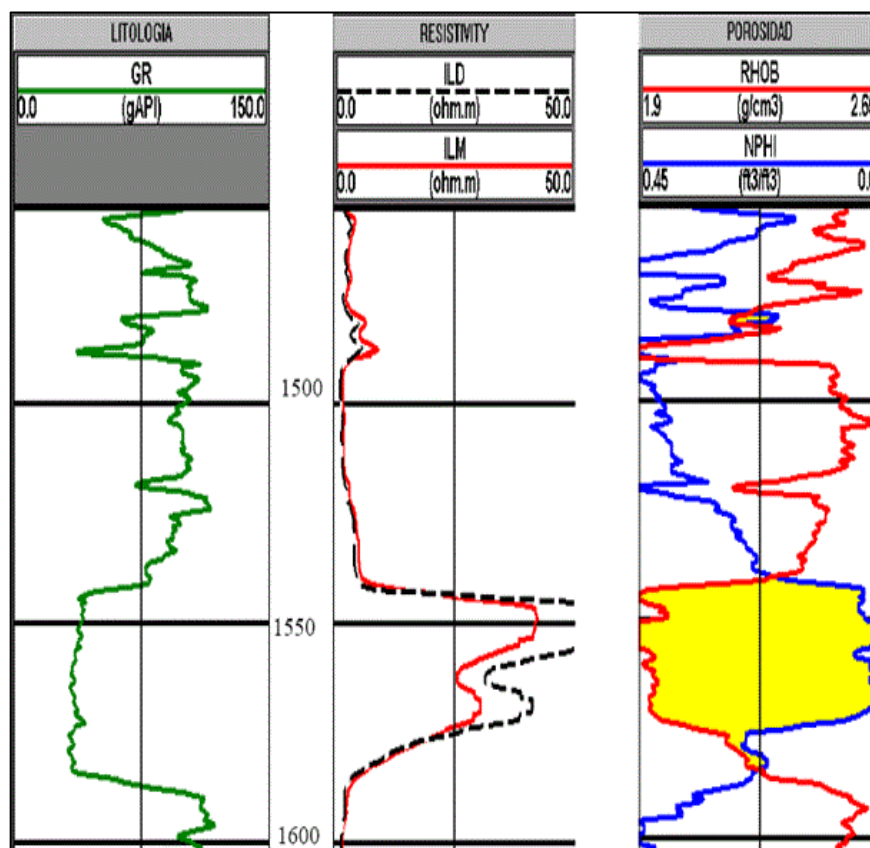


Figura 3.3 Representación de Registro Gamma Ray (Gr)  
(Color Verde)

**Fuente:** Foto Tomada de Internet.

### 3.2.4 Registro Sónico

Con este registro se mide la velocidad de las ondas de sonido en la roca. Esta velocidad dependerá de: litología, cantidad de poros interconectados y del tipo de fluidos que estén en los poros. Este método es útil para delimitar estratos de baja velocidad como lentes de carbón, o areniscas pobremente cementadas; así como materiales de alta



velocidad como areniscas altamente cementadas o carbonatos (Figura 3.4).

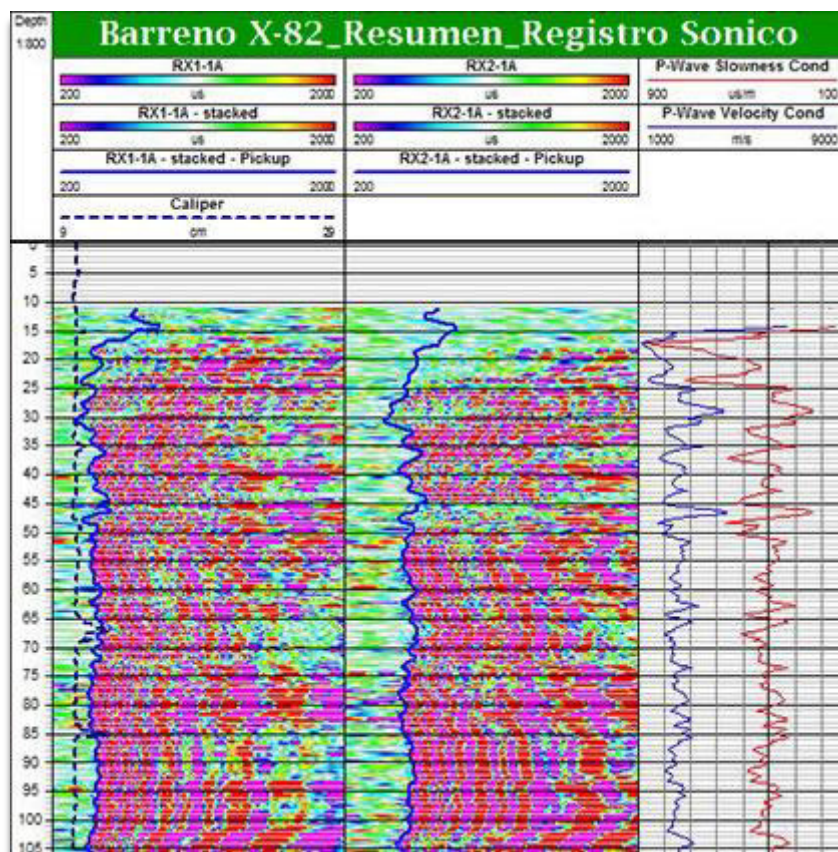


Figura 3.4 Representación de un Registro Sónico  
(Colores Azul y Rojo)

Fuente: foto tomada de internet.

### 3.2.5 Registro Caliper

Este registro mide el diámetro del pozo perforado y da una indicación de su condición, por lo tanto permite estimar la confiabilidad de los otros registros tomados en el pozo.

Un ensanchamiento del pozo puede indicar cavidades o caídas de las paredes del pozo lo cual puede generar errores en las lecturas de los registros. Este registro es particularmente útil en sucesiones mezcladas de evaporitas donde la lixiviación ha removido a las evaporitas más solubles (Figura 3.5).

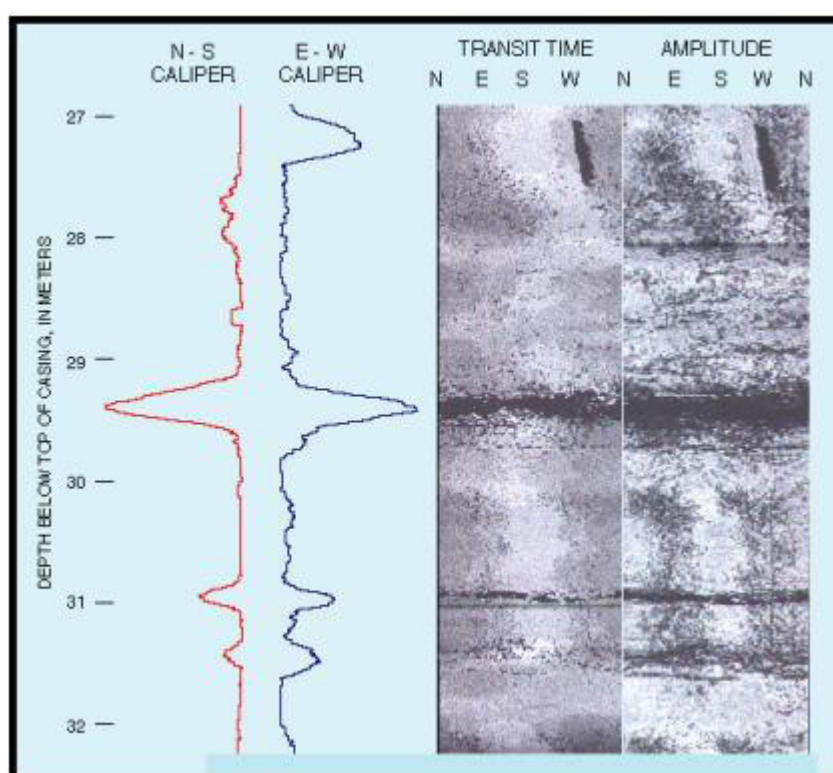


Figura 3.5 Representación de un Registro Caliper (Colores azul y rojo) a la izquierda.  
**Fuente:** Foto Tomada de Internet.

### 3.2.6 Registro de Densidad

Los registros de densidad (density) y neutrón son los usados para determinar la porosidad. La herramienta del density emite una radiación gama la cual se dispersa hacia un detector y esta radiación llega en cantidades proporcionales a la densidad de los electrones de la roca, la densidad del electrón en la mayoría de los casos está relacionada a la densidad del material sólido de la formación y a la densidad de los fluidos en los poros (Figura 3.6). La porosidad density es calculada asumiendo una densidad de la materia sólida y líquida

2.35 para lutitas

2.65 g/cm<sup>3</sup> para areniscas

2.71 g/cm<sup>3</sup> para calizas

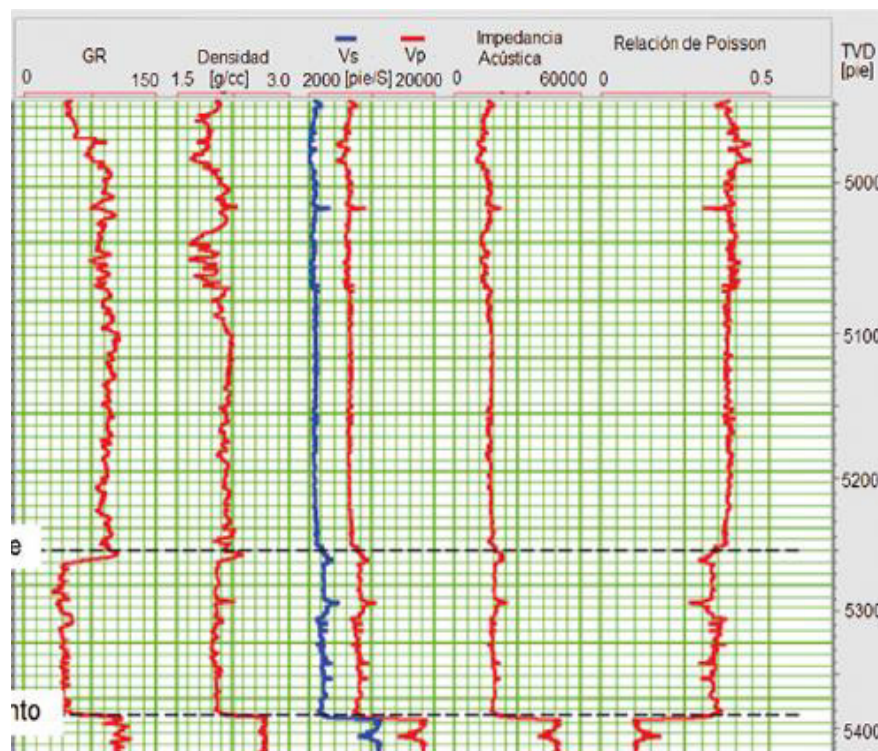


Figura 3.6 Representación De Un Registro Density (Colores rojo) a la izquierda.

Fuente: Foto tomada de internet.

### 3.2.7 Registro neutrón

El registro neutrón mide en cambio la concentración de hidrógeno (sea en agua o petróleo) en la roca. Esta herramienta emite neutrones de un conocido nivel de energía y mide el cambio de energía cuando estos neutrones vuelven al detector reflejados desde la roca. Debido a que la energía es transferida más fácilmente a partículas de masas similares, la concentración de hidrogeno puede ser calculada. La porosidad neutrónica es calculada asumiendo que el petróleo y el agua se

encuentran llenando los poros en la roca. El gas y el agua relacionados a minerales arcillosos pueden dar lecturas anómalas (Figura 3.7).

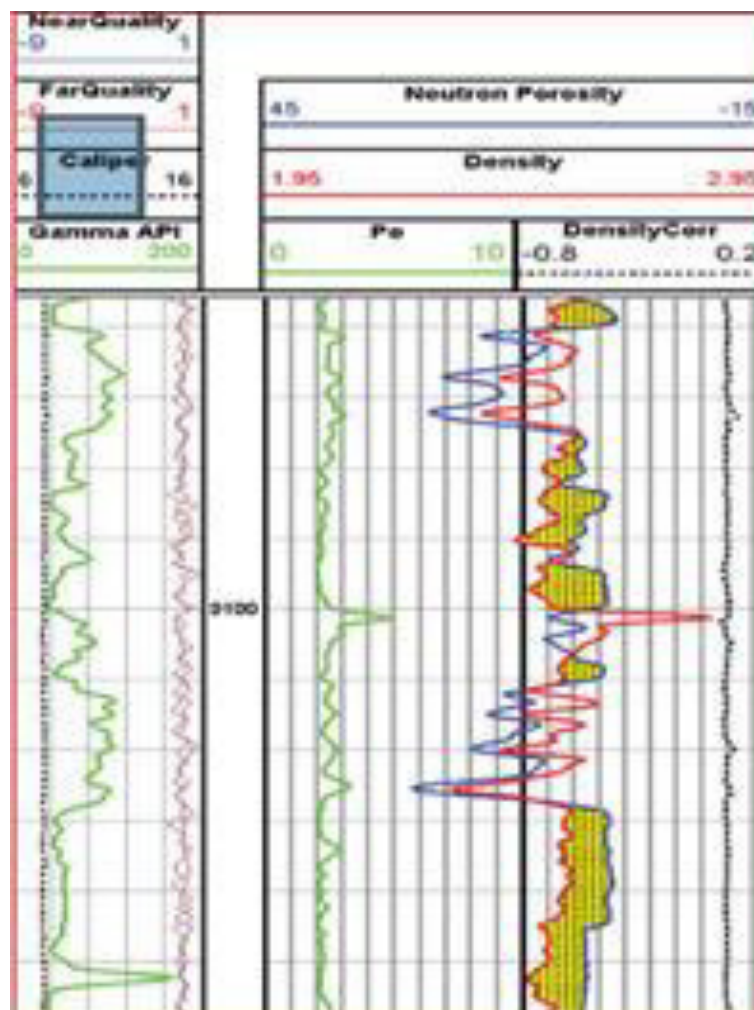


Figura 3.7 Representación de un Registro Neutrón  
**Fuente:** foto tomada de internet.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SECUENCIAS SEDIMENTARIAS**

### **4.1 Representación de una secuencia de facies**

Una secuencia de facies se puede representar por una serie de números que representan el orden en el cual se suceden las facies en una secuencia típica.

## 4.2 Litologías identificadas a partir de los registros eléctricos

Se puede distinguir esencialmente entre litologías correspondientes a diferentes niveles de energía.

**Lutitas:** los sedimentos más finos de menor energía, compuestas esencialmente de arcillas, se pueden diferenciar fácilmente de las demás por su baja resistividad (curvas RXo y Microlog), entre esas se puede diferenciar por densidad entre lutitas arcillosas y variedades muy ricas en materia orgánica de baja densidad (carbón).

**Areniscas:** se identifican esencialmente por el cruce de las curvas de densidad y neutrón, además de un bajo valor de la curva de gama-ray y de la separación de las curvas del microlog ligada a la presencia de una costra de lodo. Según la porosidad y el contenido de arcilla (indicado por GR y neutrón), se distinguen entre areniscas gruesas y finas.

**Otras litologías:** las litologías que no corresponden ni a areniscas ni a lutitas tienen en general valores altos de las curvas de RXo y de microlog y no presentan la separación de curvas de neutrón y densidad típica de las areniscas. Se la subdivide entre limolitas, calizas o limolitas calcáreas y calizas macizas o sideríticas en base al valor de la curva de densidad (de mayor a menor porosidad), también difieren frecuentemente por los

valores de las curvas de neutrón y de gama-ray pero no de manera menos sistemática (las limolitas tienden a ser más arcillosas).

A partir de las litologías definidas anteriormente se define una escala de energía de ambiente, desde las rocas de grano fino a las de grano grueso y desde las más cementadas a las más porosas.

De menor a mayor energía : carbón(1), calizas macizas y sideríticas(2), calizas o limolitas calcáreas (3), lutitas(4), limolitas(5), areniscas finas(6) y areniscas gruesas(7).

#### **4.2.1 Ordenamiento de las litologías en secuencias de facies**

Las litologías previamente identificadas se ordenan en secuencias de canales, lagunas y barras, a veces terminadas por paleosuelos o carbón, las cuales reflejan variaciones de profundidad de agua y pueden ser utilizadas para evidenciar variaciones relativas del nivel del mar. Los autores clásicos utilizaron secuencias ordenadas de ese tipo para poner en evidencia las variaciones cíclicas de nivel del mar en las secuencias sedimentarias de plataforma del Carbonífero (Ciclotemas de carbón–Duff & Walton), ellos utilizaban para definir esas secuencias datos paleontológicos que no están disponibles a través de los datos de registros eléctricos de pozos petroleros de que disponemos. Una simple



secuencia de facies ordenadas por energía no puede reflejar suficiente variedad para ese propósito. Hay litologías muy similares en cuanto a nivel de energía que corresponden a profundidades de agua muy distintas.

Una manera de diferenciar entre esas litologías de misma energía correspondientes a profundidades de agua distintas es ubicándolas dentro de las secuencias de las cuales forman parte. En un principio definimos dos secuencias típicas con diferente distribución de la energía, una de canal y una de lagunas y barras, y en cada una redefinimos el orden de las facies en función de la profundidad de agua.

En la figura 4.1 se muestra dos formas de re-asignar el número de facies definido por el nivel de energía en 2 tipos de secuencias, una de alta energía (Canal-Mudflat) y otra de baja energía (Laguna-Barra).

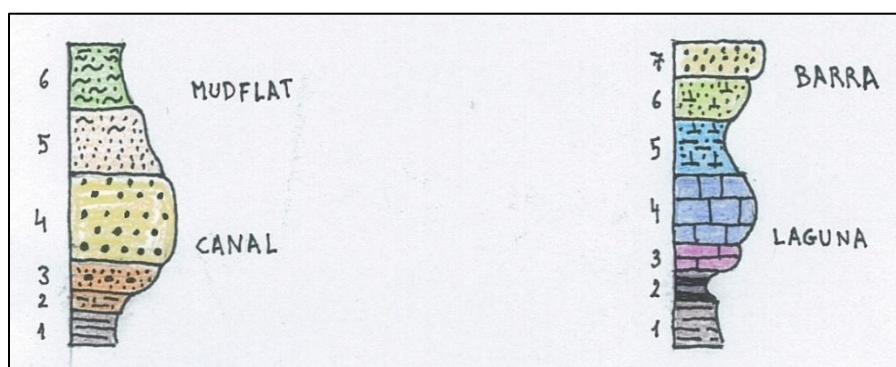


Figura 4.1 Ordenamiento en secuencias de facies por nivel de energía.  
Fuente: Diseño del Ing. Pierre Kummert

En la primera hay 2 tipos de arena fina (3 y 5) y 2 de limolita (2 y 6), y uno de arena gruesa (4), además de la lutita marina basal (1), en el segundo hay un nivel de carbón (2), uno de caliza siderítica (3), uno de caliza (4), uno de limolita (5), y de arenas fina y gruesa (6,7).

Esas dos secuencias son posibles en la arena U de Sacha (completa o incompleta y hasta combinadas en un mismo pozo), y en ambos casos la posición en la secuencia puede ser utilizada como indicador del nivel bajo el agua.

En el modelo global se debe integrar las dos secuencias en una sola lista ordenada de números, ese problema ya lo contemplaban los modelos clásicos, se definía secuencias-tipo locales que no contenían todas las facies de la serie, y una secuencia-tipo global que era la combinación de esas secuencias locales.

En el caso de la Arenisca U hemos combinado las dos secuencias-tipo locales ilustradas arriba (Figura 4.2), añadiendo términos adicionales en fin de secuencia (los mismos para ambas) para representar paleosuelos y litologías no marinas como carbón, caolín y arenas de playa o duna. También se añadió una facie de Hard-Ground (superficie endurecida de no deposición) en la base de la secuencia global, ese tipo de litología es

una facie transgresiva que se reconoce por un alto valor del gama-ray (pico de Uranio).

| #WDPT | VALOR  | Descripcion                                  |
|-------|--------|--|
| #---- | -----  | -----  |
| CB .  | 1      | : Carbon vegetal in situ, suelo organico     |
| UC .  | 2      | : Suelo caolinico (underclay)                |
| LS .  | 3      | : Suelo limoso y caolinico                   |
| AS .  | 4      | : Suelo arenoso o Arenisca fina de duna      |
| AB .  | 5      | : Areniscaa de playa o de barra litoral      |
| LI .  | 6      | : Limolita bioturbada o laminada             |
| AC .  | 7      | : Arenisca cementada de borde de laguna      |
| AF .  | 8      | : Arenisca fina laminada o con flasers       |
| LC .  | 9      | : Limolita calcarea o cementada              |
| AG .  | 10     | : Arenisca gruesa bien sorteada de canal     |
| CA .  | 11     | : Caliza o limolita calcarea lagunar         |
| AL .  | 12     | : Arenisca con clastos arcillosos            |
| CS .  | 13     | : Caliza sideritica o piritosa anoxica       |
| LA .  | 14     | : Limolita arcillosa de base de canal        |
| LO .  | 15     | : Lutita organica, carbon transportado       |
| HG .  | 16     | : Hard-Ground (glauconita, conchas, fosfato) |
| LU .  | 17     | : Lutita arcillosa marina                    |
| ~A    | TVD    | DEPT ENRG WDPT                               |
| 9381. | 9381.0 | 4 17   |
| 9382. | 9382.0 | 4 17   |
| 9383. | 9383.0 | 4 17   |
| 9384. | 9384.0 | 4 17   |
| 9385. | 9385.0 | 4 17   |
| 9386. | 9386.0 | 5 9  |
| 9387. | 9387.0 | 3 11   |
| 9388. | 9388.0 | 5 11   |
| 9389. | 9389.0 | 5 9  |
| 9390. | 9390.0 | 3 9  |
| 9391. | 9391.0 | 5 11   |
| 9392. | 9392.0 | 5 9  |
| 9393. | 9393.0 | 3 14   |

| Well Log | Depth  | Energy | Order |
|----------|--------|--------|-------|
| 9416.    | 9416.0 | 3      | 11    |
| 9417.    | 9417.0 | 4      | 2     |
| 9418.    | 9418.0 | 4      | 2     |
| 9419.    | 9419.0 | 4      | 2     |
| 9420.    | 9420.0 | 3      | 9     |
| 9421.    | 9421.0 | 5      | 11    |
| 9422.    | 9422.0 | 5      | 2     |
| 9423.    | 9423.0 | 5      | 2     |
| 9424.    | 9424.0 | 4      | 2     |
| 9425.    | 9425.0 | 4      | 3     |
| 9426.    | 9426.0 | 5      | 9     |
| 9427.    | 9427.0 | 5      | 9     |
| 9428.    | 9428.0 | 3      | 3     |
| 9429.    | 9429.0 | 5      | 3     |
| 9430.    | 9430.0 | 6      | 9     |
| 9431.    | 9431.0 | 7      | 9     |
| 9432.    | 9432.0 | 7      | 11    |
| 9433.    | 9433.0 | 4      | 7     |
| 9434.    | 9434.0 | 4      | 7     |
| 9435.    | 9435.0 | 4      | 5     |
| 9436.    | 9436.0 | 6      | 14    |
| 9437.    | 9437.0 | 7      | 14    |
| 9438.    | 9438.0 | 7      | 9     |
| 9439.    | 9439.0 | 7      | 7     |
| 9440.    | 9440.0 | 7      | 5     |
| 9441.    | 9441.0 | 7      | 5     |
| 9442.    | 9442.0 | 7      | 5     |
| 9443.    | 9443.0 | 7      | 7     |
| 9444.    | 9444.0 | 7      | 5     |
| 9445.    | 9445.0 | 6      | 5     |
| 9446.    | 9446.0 | 6      | 5     |
| 9447.    | 9447.0 | 6      | 12    |
| 9448.    | 9448.0 | 7      | 12    |

Figura 4.2 Integración de las dos Secuencias de Facies Por niveles de energía en profundidad.

**Fuente:** diseño del ing. Pierre Kummert.

La secuencia global combinada es la siguiente: El número de orden ha sido invertido para corresponder a profundidades de agua crecientes, desde litologías continentales a lutita de mar abierto, pasando por las diferentes facies del ambiente litoral. Entre paréntesis se indica el sub-ambiente o columna local (canal-mudflat (C), laguna-barra (L), fin de secuencia no marina (S), o hard-ground (H)).

Se escribió un pequeño programa (Fortran 95) para transformar las 7 facies iniciales determinadas por energía de ambiente a las de la secuencia-tipo de profundidad de agua tomando en cuenta las asociaciones entre litologías sucesivas, y con eso probar los métodos de procesamiento de la secuencia de cada pozo; esa conversión automática resultó solo parcialmente correcta y la secuencia final tuvo que ser corregida manualmente pozo por pozo.

Para una mejor visualización la figura 4.3 muestra a la derecha de las facies los datos procesados por energía de ambiente en profundidad, cuando no coincidían con las facies, era necesario volver a procesarlos.

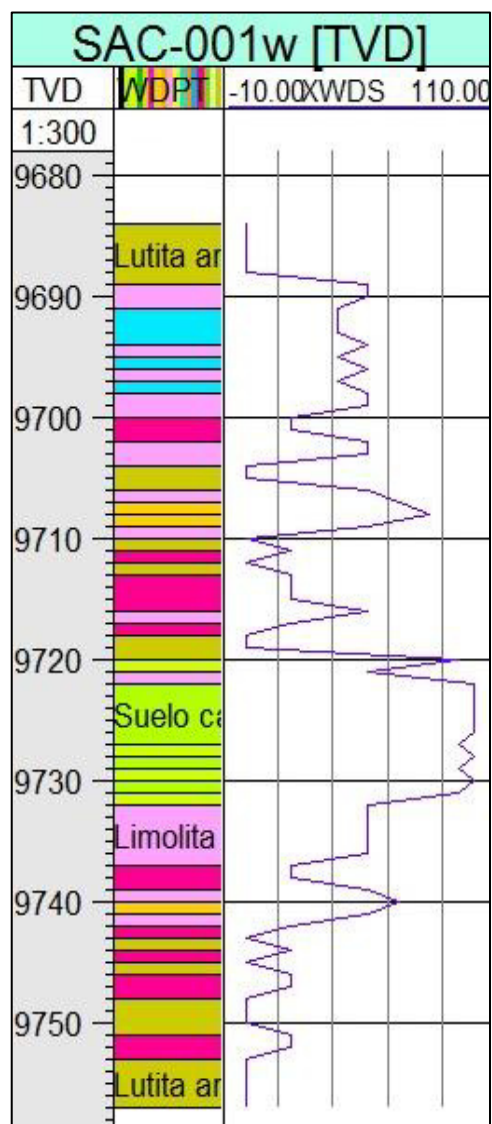


Figura 4.3 Valores De Energía De Ambiente En  
**Fuente:** Datos Procesados en el Programa Petrel.

#### 4.2.2 Secuencia-tipo global utilizada

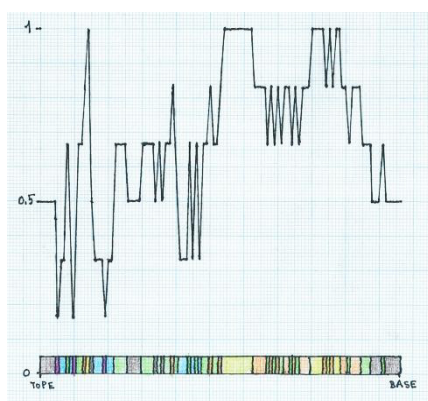
**Tabla II Secuencia Tipo Global Utilizada**

| Número de orden | Código asociado | Secuencia local | Descripción   |
|-----------------|-----------------|-----------------|---|
| 17              | LU              | Todas           | Lutita de mar abierto                                   |
| 16              | HG              | H               | Kard-ground (restos de conchas, glauconita, fosfato)    |
| 15              | LO              | L               | Lutita rica en materia orgánica (ambiente anóxico)      |
| 14              | LA              | C               | Limolita arcillosa de base de canal                     |
| 13              | CS              | L               | Caliza o marga siderítica o piritosa (ambiente anóxico) |
| 12              | AL              | C               | Arena fina de base de canal, con clastos arcillosos     |
| 11              | CA              | L               | Caliza o limolita calcárea muy cementada                |
| 10              | AG              | C               | Arena gruesa de canal, maciza.                          |
| 9               | LC              | L               | Limolita calcárea                                       |
| 8               | AF              | C               | Arena fina de canal, más o menos laminada, con flasers  |
| 7               | AC              | L               | Arena con cemento calcáreo, arena fina de barra         |
| 6               | LI              | C               | Limolita de mudflat, bioturbada                         |
| 5               | AB              | L               | Arenisca gruesa de barra                                |
| 4               | AS              | S               | Suelo arenoso (playa o duna)                            |
| 3               | LS              | S               | Suelo limoso  |
| 2               | UC              | S               | Underclay, suelo caolínico                              |
| 1               | CB              | S               | Carbón in situ  |

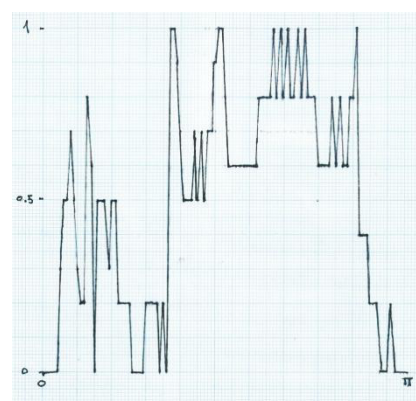
La Tabla 2 muestra la secuencia tipo que se utilizó, algunas de estas facies no se pueden distinguir de otras solo por la respuesta de los registros eléctricos convencionales, en muy pocos pozos se dispone de registros como el GR espectral que ayudan a discriminar, en la mayoría de los casos la facie finalmente atribuida a un nivel es determinada después de un procesamiento provisional de la serie del pozo y cambiada para que correlacione con los pozos vecinos.

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo (pozo Sacha 29) de curvas obtenidas para el estudio de las secuencias, la primera (a) con la clasificación inicial en 7 facies por nivel de energía (de -3 a 3, con el valor

0 para la lutita), y la segunda (b) con valores de 0 a 16 (17-F; 0 para la lutita marina), esos valores son normalizados entre -1 y +1 en el primer caso y entre 0 y 1 en el segundo para facilitar los cálculos que se usarán en el procesamiento de las curvas.



(a) 7 facies



(b) 17 facies

Figura 4.4 Curvas obtenidas por clasificación de facies

### **4.3 Procesamiento de las secuencias de facies**

La serie de números de orden de una secuencia de facies es una serie de tiempo, si se supone que la tasa de sedimentación es constante, lo que es una buena aproximación si se trabaja con valores promedios sobre intervalos de espesor suficiente, y cuando no hay mucha diferencia de espesor de columna entre los pozos.

En el intervalo de la Arenisca U esa condición está realizada entre buena parte de los pozos, pero una cantidad importante de ellos tienen un espesor total de columna bastante superior al promedio (a veces casi el doble), eso indica que la sedimentación está afectada por eventos tectónicos sin-sedimentarios.

La mayor parte de esos pozos con espesor anómalo de sedimentos están alineados a lo largo de segmentos de líneas rectas, lo que indica que hubo fallas activas durante una parte del tiempo de sedimentación. Las areniscas se concentran principalmente en esas áreas donde la columna es más espesa, especialmente en la parte inferior del intervalo, lo que indica una canalización del aporte detrítico en depresiones tectónicas en la época correspondiente; ese aporte detrítico no era suficiente como para llenar de arena todas las depresiones ni para cubrir con arenas la áreas situadas entre los canales, las áreas



correspondientes se llenaron con sedimentos finos y hasta calcáreos en algunas partes, también se formaron rocas residuales (paleosuelos) en partes altas durante las épocas de bajo nivel del mar. Esa diversidad de ambientes obliga a trabajar con varias secuencias-tipo combinadas.

#### **4.4 Ciclos de transgresión y regresión**

Las secuencias de facies no son funciones continuas, sino sucesiones de eventos de sedimentación y erosión apilados en forma caótica, sin embargo cada banco o grupo de bancos tiene características promedio que se pueden ordenar en procesos continuos que reflejan las variaciones eustáticas del nivel del mar, produciendo repeticiones cíclicas de partes de una secuencia. Para poder evidenciar esas variaciones cíclicas es necesario suavizar las curvas correspondientes a las secuencias, eliminando variaciones de alta frecuencia, cuya extensión lateral es muy limitada, y muchas veces no se pueden correlacionar ni entre dos pozos vecinos. Para esto se pueden utilizar los métodos de análisis de series de tiempo, como la media móvil o el desarrollo en serie de Fourier.

## 4.5 Series de Fourier

Toda función, continua o no, puede ser representada sobre un intervalo de 0 a  $2\pi$ , por una combinación lineal de senos y cosenos (desarrollo en serie de Fourier), cuya fórmula se da en la figura 4.5 a continuación.

DESARROLLO EN SERIE DE FOURIER

$$D.F. = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n \cos(n\pi x) + \beta_n \sin(n\pi x))$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$\alpha_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(n\pi x) dx$$

$$\beta_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(n\pi x) dx$$

Figura 4.5 Ecuación de una Serie de Fourier  
Fuente: Diseño del Ing. Pierre Kummert

Con funciones representadas por una serie de valores numéricos, esos cálculos se reducen a simples sumas de combinaciones de los valores de  $\sin(x)$  y  $\cos(x)$  en cada punto, donde los valores de  $x$  son espaciados de  $2\pi/(N-1)$  si se tienen  $N$  valores de datos, y los valores de  $\sin$  y  $\cos$  se calculan uno a partir de otro por las fórmulas trigonométricas de suma de ángulos.

#### 4.5.1 Preparación de los datos

Para el desarrollo en serie de Fourier, se necesita disponer de datos correspondientes a un ciclo completo, con  $f(1)=f(N)$ , para esto se reemplaza los valores de  $x$  por valores de 0 a  $2\pi$ , usando un intervalo de muestreo de  $(N-1)/(2\pi)$ , también se puede trabajar con un medio ciclo (también con  $f(1)=f(n)$ ) y un intervalo de muestreo de  $(N-1)/\pi$ , si se lo completa por simetría con un medio ciclo ficticio hasta  $2\pi$  ( $2N-1$  valores de  $x$ ). Esa opción es conveniente porque en realidad se trabaja solo sobre la parte regresiva del ciclo completo, la mitad transgresiva está compuesta de litologías marinas (calizas y lutitas) que no se diferencian bien en los registros eléctricos y que no nos interesan (no importa si ese medio ciclo ficticio corresponde o no a la realidad, se lo usa solo para calcular los coeficientes de Fourier para el medio ciclo que se estudia y se lo ignora en el resto del análisis).

Se puede completar ese medio ciclo ficticio para obtener un ciclo puro, o con un medio ciclo invertido, en el caso en que se piensa que la regresión está ligada a un evento tectónico inicial (o la transgresión a un evento final). Esas dos opciones están representadas en las figuras siguientes.

Habrá diferencias en los resultados si el medio ciclo estudiado es muy asimétrico, en caso contrario los resultados de las dos opciones serán muy parecidos entre sí (figura 4.6).

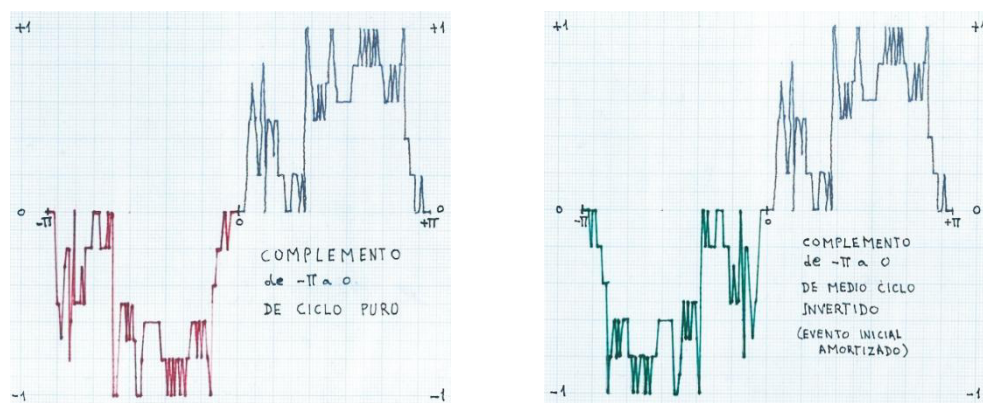


Figura 4.6 Representación de un Ciclo Completo en una Serie de Fourier

#### 4.5.2 Determinación del número de frecuencias del desarrollo

El principal objetivo del procesamiento por desarrollo en serie de Fourier es determinar la existencia de ciclos menores en una secuencia cíclica, si se limita el desarrollo a un pequeño número de términos, eso elimina la contribución de términos de alta frecuencia, los cuales corresponden a ruido o a eventos de corta duración. Para limitar el desarrollo al número adecuado de términos, se observa cómo evoluciona la varianza residual entre la curva cruda y el desarrollo de Fourier en función del número de términos incluidos. La figura 4.7 indica esa variación en el caso del pozo

29 para la curva de facies de profundidad de agua, en las dos opciones de complementar el medio ciclo.

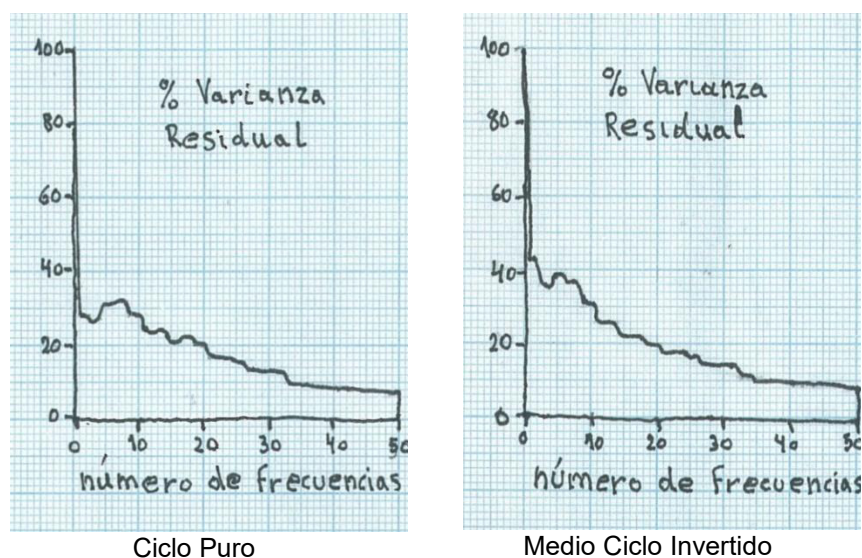


Figura 4.7 Representación de la Varianza Residual por número de frecuencias.

Se nota que hay poca diferencia entre las dos opciones, excepto para los primeros términos (menos de 10, lo cual indica una tendencia globalmente asimétrica, pero no un evento inicial o final importante), también se nota que hay términos que, tomados aisladamente, aumentan esa varianza en vez de reducirla, lo que indica que esas frecuencias no corresponden a componentes cíclicas reales de la secuencia. El desarrollo se debe limitar en frecuencias que corresponden a un descenso significativo de la varianza residual, en el caso del pozo 29 se representan las curvas suavizadas correspondientes a valores que

cumplen con ese criterio, en ambas opciones (con un valor menor a los escogidos se obtenían solo dos ciclos principales) (figuras 4.8).

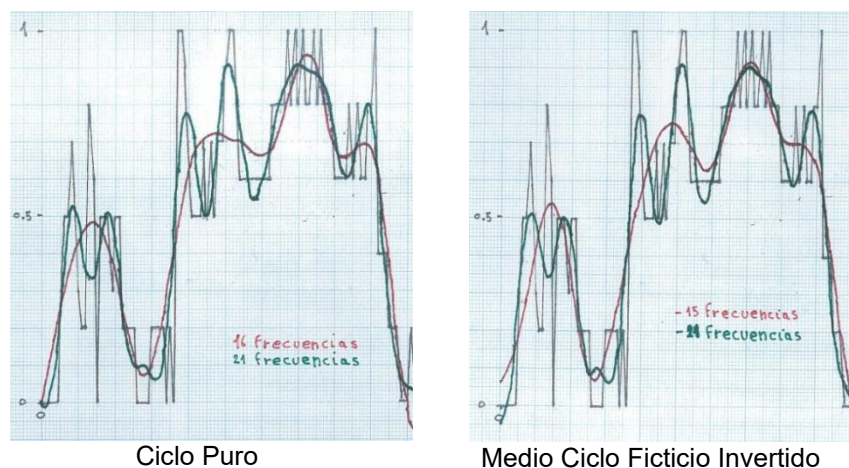


Figura 4.8 Representación de las Curvas procesadas por número de frecuencias (ciclo puro)

**Fuente:** diseño del Ing. Pierre Kummert

Como en el diagrama de varianza residual, se nota que a nivel de los ciclos menores que nos interesan en el caso del pozo 29 casi no hay diferencias, eso parece indicar que los eventos tectónicos que pueden haber influenciado la sedimentación no interfieren con los ciclos que representan la mayor parte de la varianza de la curva (ni son causantes de esos ciclos).

Con esos resultados se determina un rango de valores de frecuencia de corte para aplicar a los demás pozos y tratar de encontrar una función eustática común para todos.

### **4.5.3 Otras opciones de modificación de la curva original**

En vez de utilizar el número de facies, se puede utilizar su valor relativo con respecto a las facies vecinas, para la facies de menor número, se pone el valor 0 para los puntos extremos del medio ciclo, el valor uno para los siguientes a partir de esas extremidades, después 2 y así sucesivamente hasta acabar con esa facie (si hubiera una sola facie se obtendría una curva triangular), después se sigue atribuyendo los valores siguientes de dos en dos a partir de las extremidades para la facie siguiente en el orden de la secuencia, y se hace lo mismo hasta la facie de mayor número de orden. Al final se normaliza esos valores a un valor máximo de 1, la figura siguiente enseña el proceso para una pequeña secuencia compuesta de 3 facies (no importa los valores que tengan los números de cada facie, el resultado es el mismo si faltan facies de la secuencia tipo en la secuencia local) (figura 4.9).

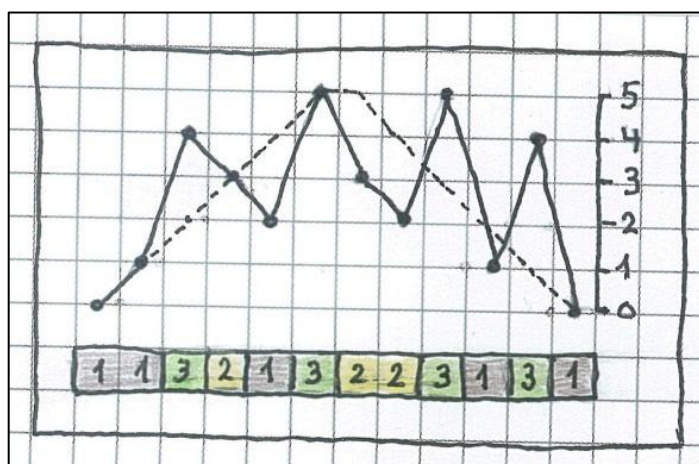


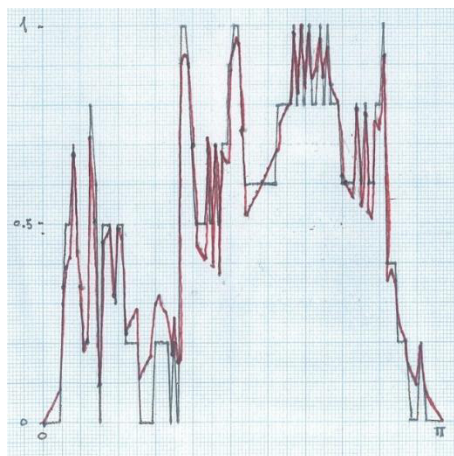
Figura 4.9 Secuencia Tipo De Tres Facies  
**Fuente:** Diseño del Ing. Pierre Kummert

Con ese método se obtiene la misma curva para dos secuencias locales compuestas de facies diferentes en el mismo orden y de valores diferentes (eso es la idea básica para correlacionar secuencias compuestas de facies distintas, correspondientes a pozos que ocupan posiciones diferentes con respecto a la línea de costa, o a ambientes de diferentes niveles de energía). En ese tipo de procesamiento, se da una mayor diferencia de valor entre las facies más abundantes sucesivas que entre las más escasas. Después se desarrolla en serie de Fourier como para las secuencias normales.

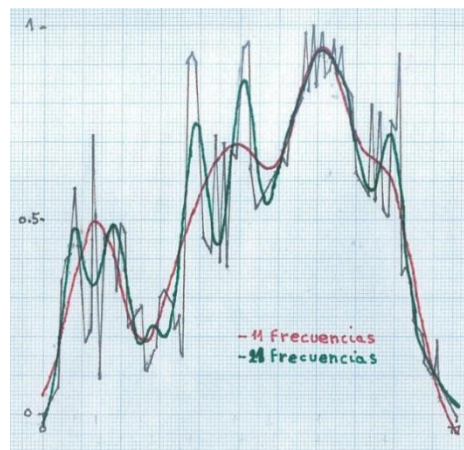
La figura 4.10 siguiente muestra el resultado para el pozo 29, antes y después del desarrollo de Fourier, y las curvas de variación de la varianza residual en el caso de ciclo puro y medio-ciclo invertido. La fuerte baja de varianza residual con la primera frecuencia es



consecuencia del proceso (se reemplaza una secuencia uniforme en promedio).



Procesamiento en valores relativos



Desarrollo de Fourier de la curva procesada

Figura 4.10 Antes y Después del desarrollo de la Serie de Fourier

Fuente: Diseño del Ing. Pierre Kummert

#### 4.6 Uso de Fortran 95 para alisamiento de curvas por serie de Fourier

Se diseñó un programa en Fortran 95 para aplicar la serie de Fourier a los valores de facies de energía y profundidad de agua de un pozo.

Se ingresa un código de pozo en el formato LAS (Log ASCII Standard - VERSION 1.2) para que pueda ser reconocido (Figura 4.12).

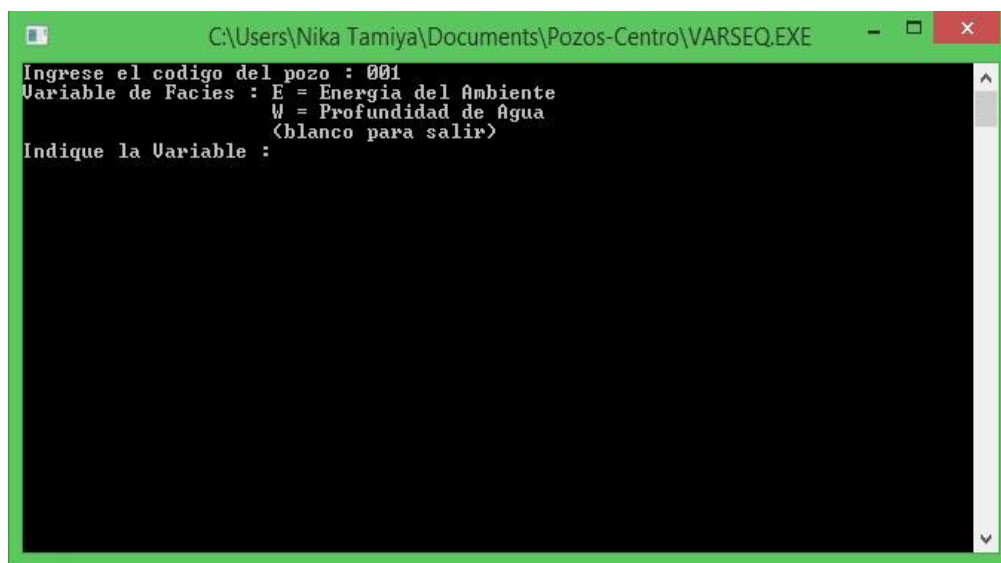


Figura 4.11 Interfaz del Fortran 95, Ingresando el código de un pozo para procesar las curvas.

**Fuente:** Diseño del Ing. Pierre Kummert

Al ingresar el código del pozo se debe ejecutar la variable de facies a suavizar: profundidad del agua (W); serie de Fourier, partición óptima. Y se selecciona la opción Espejo (E) (Figura 4.13).

```

C:\Users\Nika Tamiya\Documents\Pozos-Centro\VARSEQ.EXE
Ingrese el codigo del pozo : 001
Variable de Facies : E = Energia del Ambiente
                   W = Profundidad de Agua
                   (blanco para salir)
Indique la Variable : w
Tipo de Procesamiento : M = Media Movil
                       F = Serie de Fourier
                       P = Particion Optima
Indique el tipo : f
Simetria para complementar el medio Ciclo : C = Central <ciclo periodico>
                                             E = Espejo <evento atenuado>
Indique el tipo : e
Indique si Quiere Amplificar la serie <Integracion Triangular> :

```

Figura 4.12 Selección del Algoritmo para procesamiento de la Curva.  
**Fuente:** Diseño del Ing. Pierre Kummert

Ingresado esto se despliega un gráfico de frecuencias de la serie de Fourier en el eje X y porcentaje de varianza residual en el eje Y. Esta grafica simple muestra que hay determinados porcentajes que se mantienen momentáneamente constantes a cierto número de frecuencias. Un valor ideal a tomarse para el número de frecuencias corresponde al primero de los de porcentaje de varianza iguales, para el caso de la figura son los valores de 11 y 22 frecuencias (Figura 4.14).

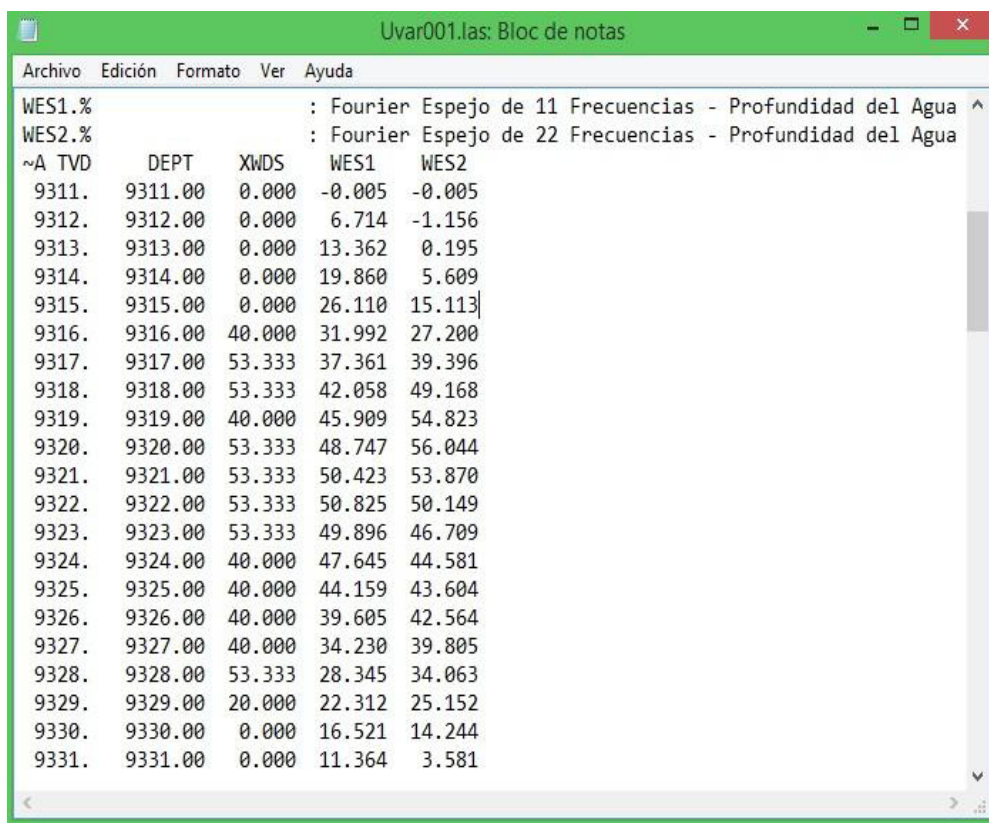
```

C:\Users\Nika Tamiya\Documents\Pozos-Centro\VARSEQ.EXE
Variable de Facies : E = Energia del Ambiente
                   M = Profundidad de Agua
                   (blanco para salir)
Indique la Variable :
      Variable MES
Diagrama de % de la Varianza Residual
      X
      X
80 X
      X
60 X
      X
40 X442 7
      XXXXXX59322
20 XXXXXXXXXXXX88876654422
      XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX9977666666555544433111111111
 0 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
 012345678901234567890123456789012345678901234567890
 0      1      2      3      4      5
Indique el numero de Frecuencias adecuado : 11
Indique si quiere guardar una curva adicional : s
Indique el numero de Frecuencias adecuado : 22
Indique si quiere guardar una curva adicional :

```

Figura 4.13 Despliegue de la Varianza Residual se observan porcentajes que se mantienen constantes a cierto número de frecuencias.

**Fuente:** Diseño del Ing. Pierre Kummert



```

Uvar001.las: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
WES1.% : Fourier Espejo de 11 Frecuencias - Profundidad del Agua ^
WES2.% : Fourier Espejo de 22 Frecuencias - Profundidad del Agua
~A TVD DEPT XWDS WES1 WES2
9311. 9311.00 0.000 -0.005 -0.005
9312. 9312.00 0.000 6.714 -1.156
9313. 9313.00 0.000 13.362 0.195
9314. 9314.00 0.000 19.860 5.609
9315. 9315.00 0.000 26.110 15.113
9316. 9316.00 40.000 31.992 27.200
9317. 9317.00 53.333 37.361 39.396
9318. 9318.00 53.333 42.058 49.168
9319. 9319.00 40.000 45.909 54.823
9320. 9320.00 53.333 48.747 56.044
9321. 9321.00 53.333 50.423 53.870
9322. 9322.00 53.333 50.825 50.149
9323. 9323.00 53.333 49.896 46.709
9324. 9324.00 40.000 47.645 44.581
9325. 9325.00 40.000 44.159 43.604
9326. 9326.00 40.000 39.605 42.564
9327. 9327.00 40.000 34.230 39.805
9328. 9328.00 53.333 28.345 34.063
9329. 9329.00 20.000 22.312 25.152
9330. 9330.00 0.000 16.521 14.244
9331. 9331.00 0.000 11.364 3.581

```

Figura 4.14 Resultado del Procesamiento de los Archivos `.las` con el Programa Fortran 95.

**Fuente:** Diseño del Ing. Pierre Kummert

#### 4.6.1 Representación de los ciclos sedimentarios

Finalmente la aplicación en Fortran 95 termina los cálculos de suavización de la curva cruda de profundidad de nivel de agua en un archivo nuevo en formato Log ASCII Standard - VERSION 1.2 el cual puede ser cargado en PETREL para observar las curvas graficadas y poder diferenciar los ciclos sedimentarios dentro de esta secuencia en cada pozo.

Este archivo generado posee ahora los valores de facies transformados en una escala de 1 a 100 para las facies en profundidad de agua menores valores corresponden a facies de mayor profundidad de agua. Hacia la izquierda de las facies están los datos de profundidad de agua, y a la derecha las curvas con valores de frecuencia suavizadas. Este cambio se realizó en la aplicación se la serie de Fourier en Fortran 95 para una mejor visualización de las curvas de los ciclos sedimentarios.

De esta manera se visualiza las curvas ya graficadas, se observar que un evento regresivo genera una deflexión hacia la derecha y un ciclo transgresivo generara una deflexión hacia la izquierda (Figura 4.16).

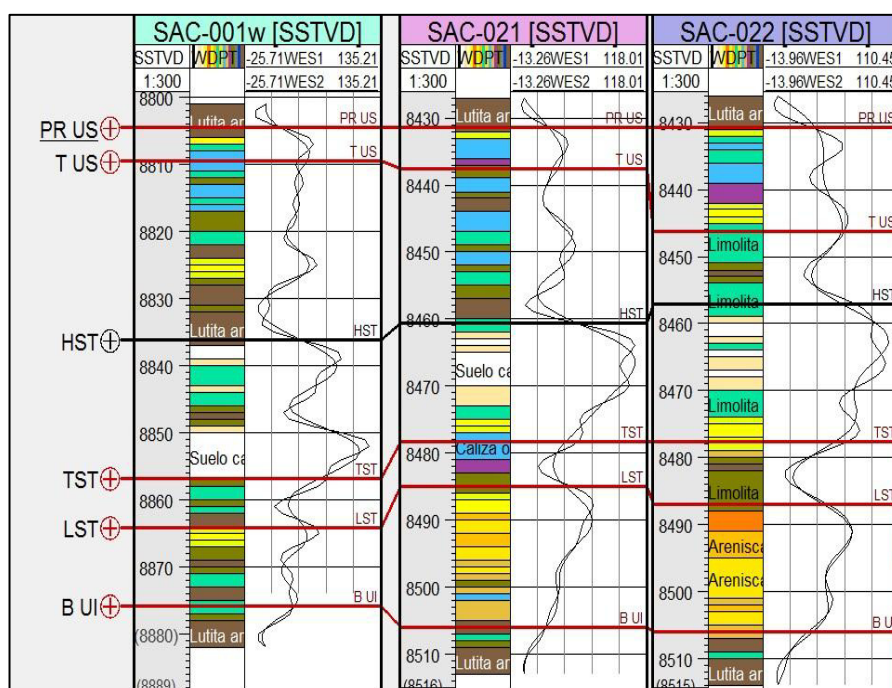


Figura 4.15 Representación de los Ciclos Sedimentarios Menores.

**Fuente:** Datos Procesados en Petrel.

#### **4.6.2 Descripción de eventos en el pozo SAC-021**

Tomando como ejemplo los ciclos sedimentarios del pozo Sacha 021 (Figura 4.17), se observa las curvas suavizadas hacia la derecha, y la columna de facies en profundidad de agua a la izquierda, a lado de esta la profundidad del pozo en TVD.

Se dividió por eventos (ciclos sedimentarios) toda la columna, dejando 30 pies de espesor para la Arenisca U Superior, que está marcada por el inicio de una fuerte transgresión al final del HST, hacia arriba.

Empezando desde abajo se observa el descenso rápido del nivel mar caracterizado como el LST, en donde se observa la presencia de arenas de playa entre finas y gruesas; este ciclo termina en el comienzo de una pequeña transgresión TST, con material arcilloso y calcáreo; luego de este evento empieza el HST en donde el nivel del mar cubre toda el área dejando residuos caoliníticos y de suelo; después de esto empieza una transgresión rápida en donde el material de sedimentación viene del continente (lutita arcillosa), con relieves de altos formados por material de plataforma calcárea; al final hay una regresión que se extiende a lo largo del continente.

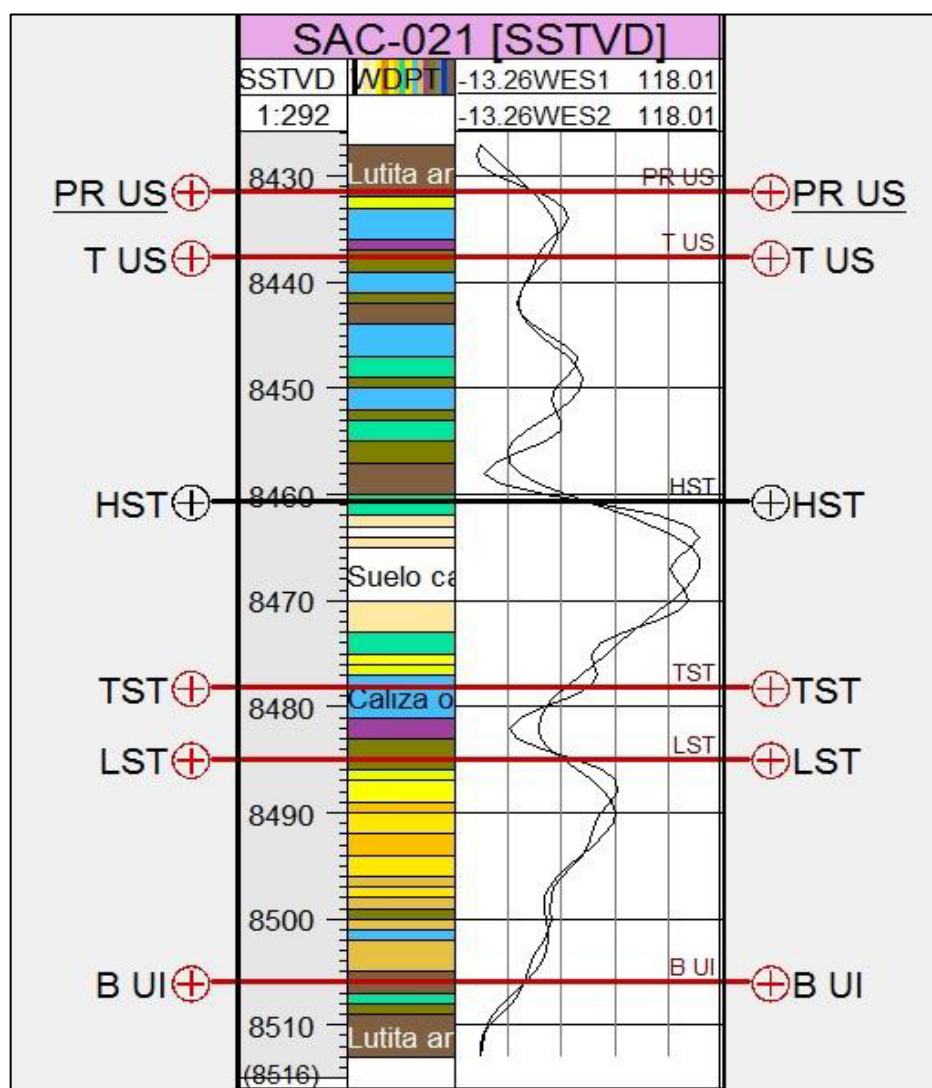


Figura 4.16 Representación De Los Eventos Ocurridos En Los Ciclos De Transgresiones Y Regresiones.

Fuente: Datos Procesados en Petrel.

#### 4.7 Obtención de ciclos sedimentarios menores

Una vez que se han procesado los datos de los pozos (archivo *.las*) en el programa Fortran se obtienen los valores de niveles de energía en



profundidad de agua, generando otro archivo (*.las*) que representan las curvas suavizadas por el algoritmo de las series de Fourier.

Cuando se cargan estos datos al programa Petrel, se despliegan tres columnas: Profundidad de Agua, Facies y las curvas suavizadas con los valores de frecuencias dados. En el perfil generado por las curvas se observan las secuencias de facies que pueden ser arenas de canal o de barra, cada inflexión representa un ciclo, si la curva está orientada hacia la derecha es una regresión, y si se orienta hacia la izquierda es una transgresión.

Debido a que los registros convencionales de pozos no ofrecen en detalle todas las facies que se encuentran a profundidad, utilizamos ciclos sedimentarios menores que nos revelan información importante para la interpretación de los posibles ambientes sedimentarios que se generaron entre una regresión y una transgresión.

# **CAPÍTULO 5**

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

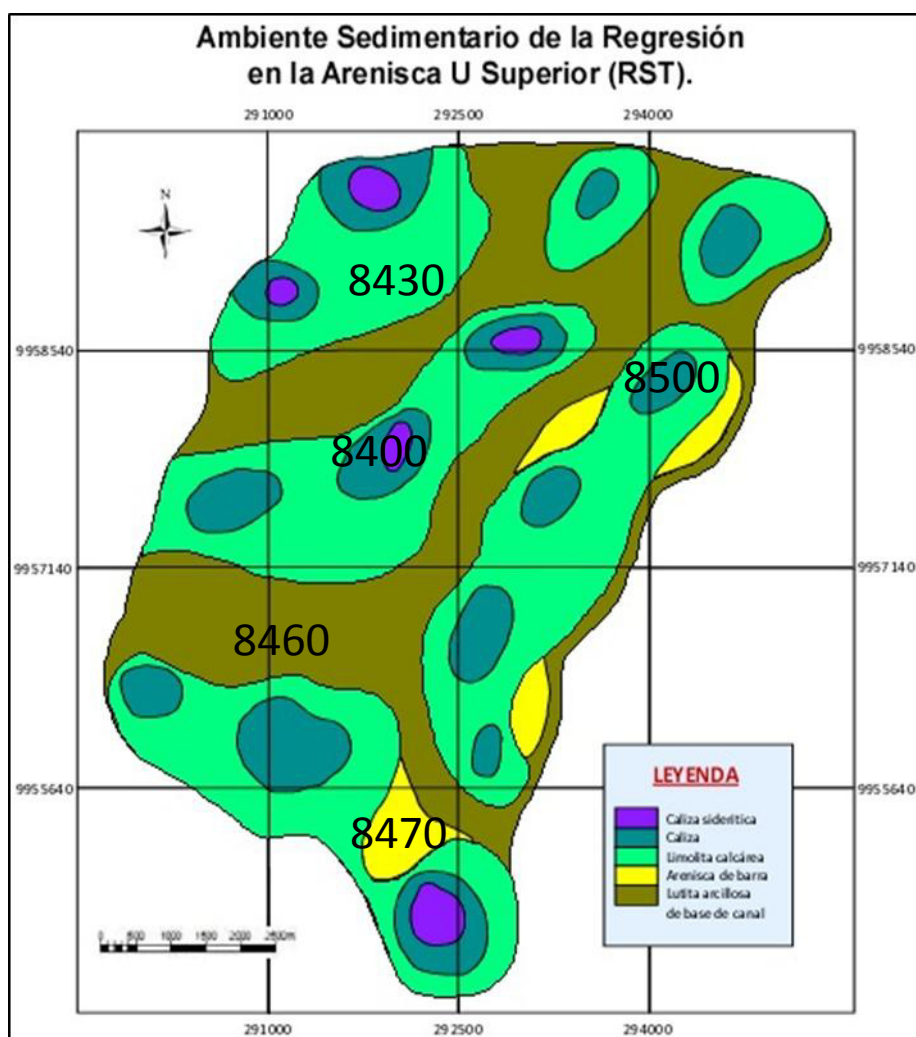
### **5.1 Interpretación de los ambientes sedimentarios generados por los ciclos sedimentarios menores**

A continuación se describe los ambientes sedimentarios por cada horizonte creado a partir de un evento de ciclo menor (los valores de las cotas son estimados puesto que el espesor de las facies varía en cada pozo, medidas en pies):

#### **5.1.1 Tope de la Arenisca U Superior (Regresión)**

Pequeña regresión por redistribución de corrientes laterales y oleaje. Cuando se retira el mar quedan las lagunas que son zonas con

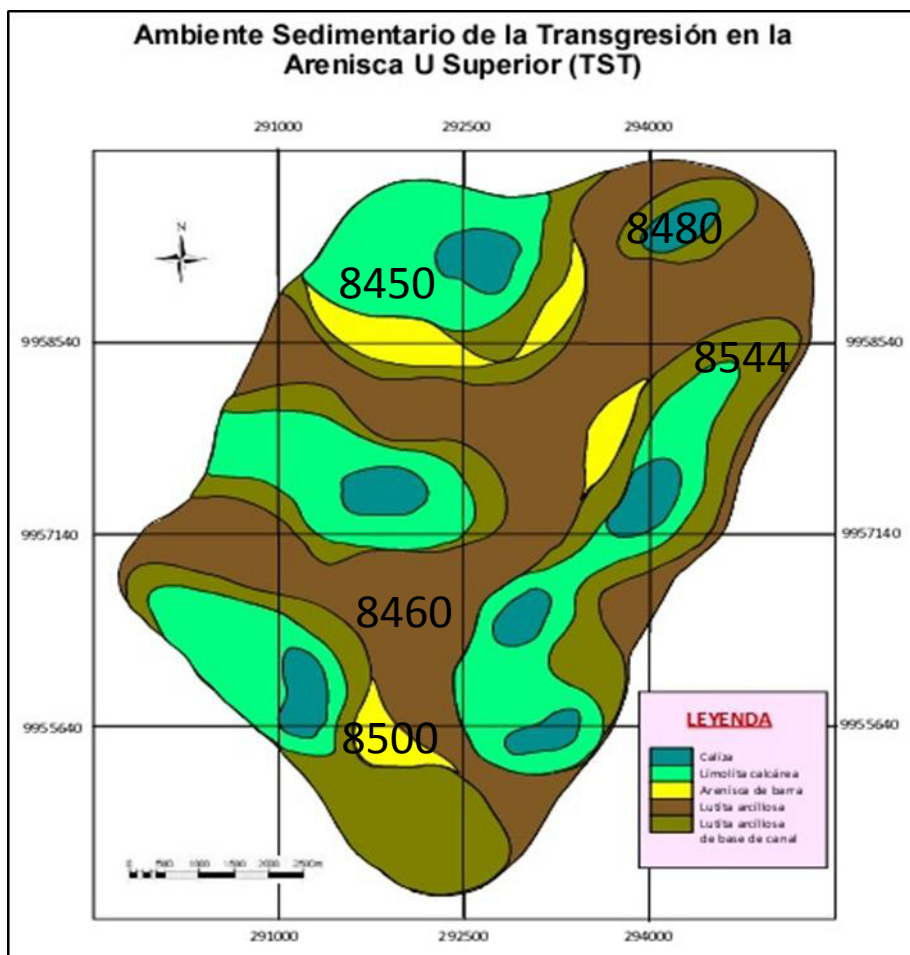
carbonato (calizas) y zonas bioturbadas que son una mezcla de lutita y limolita calcárea (representan las zonas altas), distribuidas paralelas a la costa. Existe erosión, y aporte del continente de limos finos, zonas bajas (Mapa II).



Mapa II Mapa de una Regresión (RST) en la Arenisca U Superior.  
**Fuente:** Elaborado en el graficador Canvas 15.

### 5.1.2 Transgresión de la Arenisca U Superior (TST)

Representa una transgresión avanzada, los relieves erosionados y las barras son depositadas o redistribuidas por las corrientes laterales, quedando paralelas a la costa. Los sedimentos que llegan del continente (lutita fina) se deposita en las zonas bajas (Mapa III).

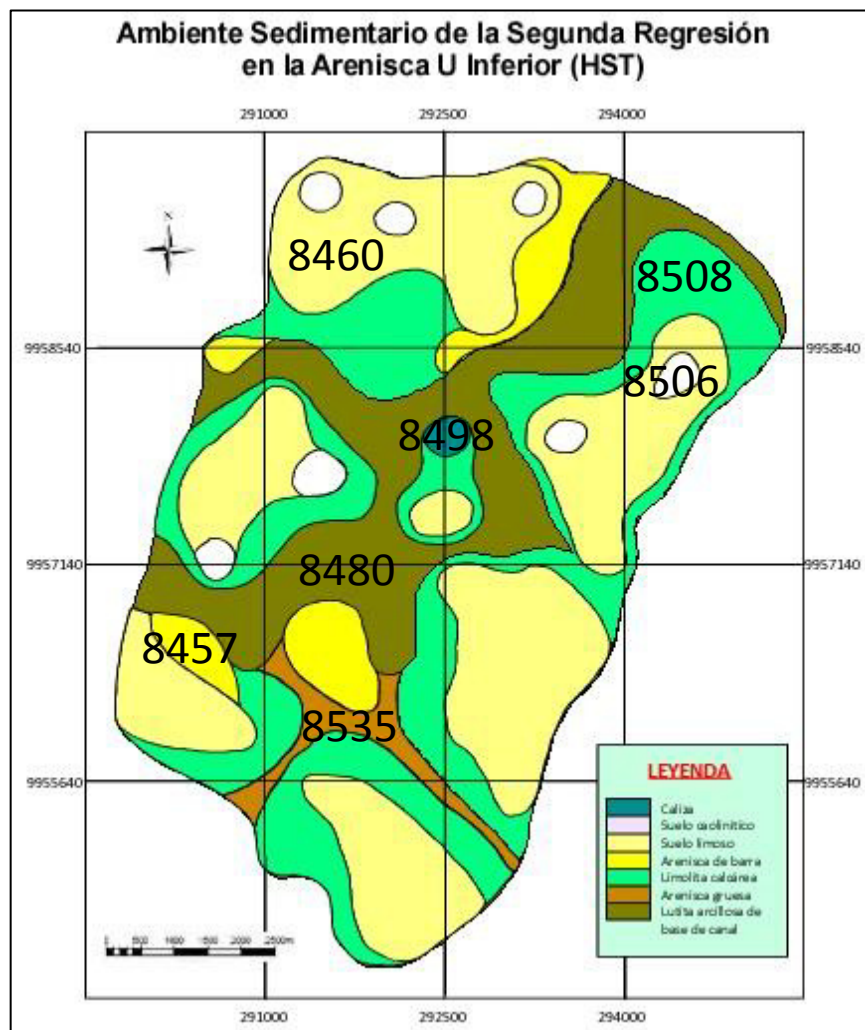


Mapa III Mapa de una Transgresión (TST) en la Arenisca U Superior.

**Fuente:** Elaborado en el graficador Canvas 15.

### **5.1.3 Segunda Regresión de la Arenisca U Inferior (HST)**

Los canales se taponan por producto de erosión debido a las olas. Hay residuos porque la mayor parte se ha salido del mar. Redistribución por marea, no hay aporte del continente. Los altos (cubierta vegetal) son paleosuelos que no son alcanzados por las olas, luego se van erosionando (Mapa IV).

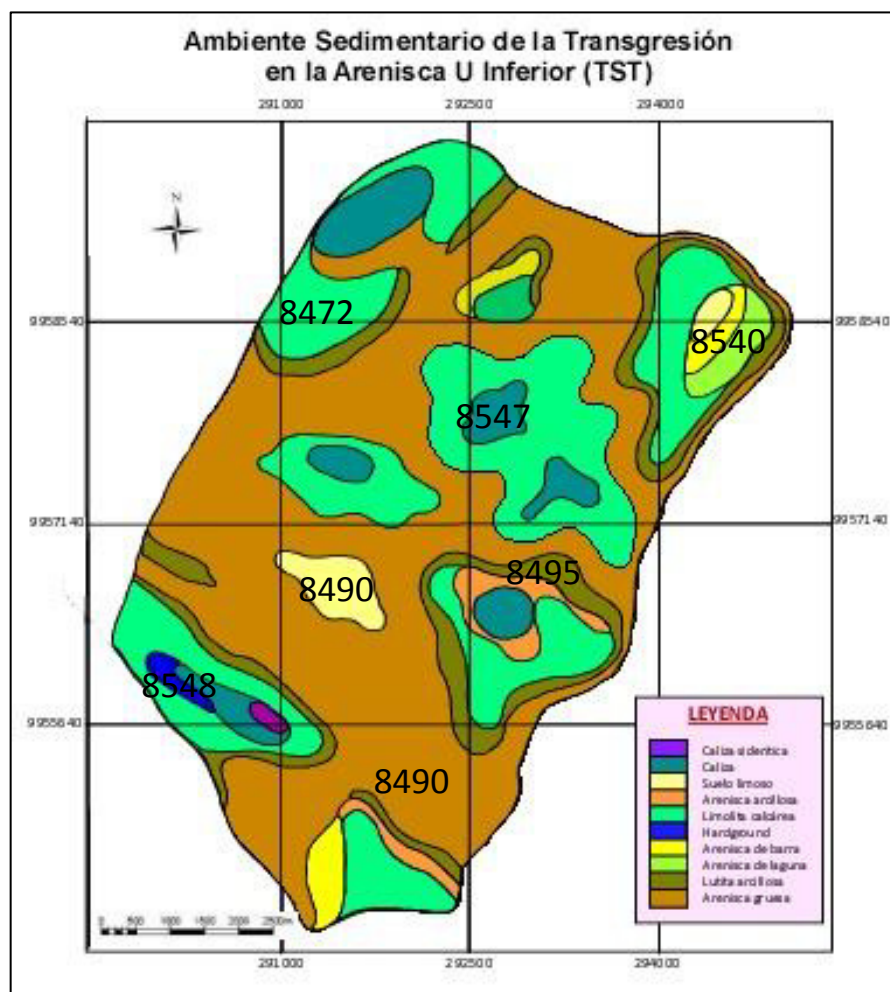


Mapa IV Mapa de una Regresión (HST) en la Arenisca U Inferior.  
Fuente: Elaborado en el graficador Canvas 15.

#### 5.1.4 Transgresión de la Arenisca U Inferior (TST)

Avance del mar en donde se ensanchan los canales debido a la erosión y las barras y lagunas de redistribuyen.

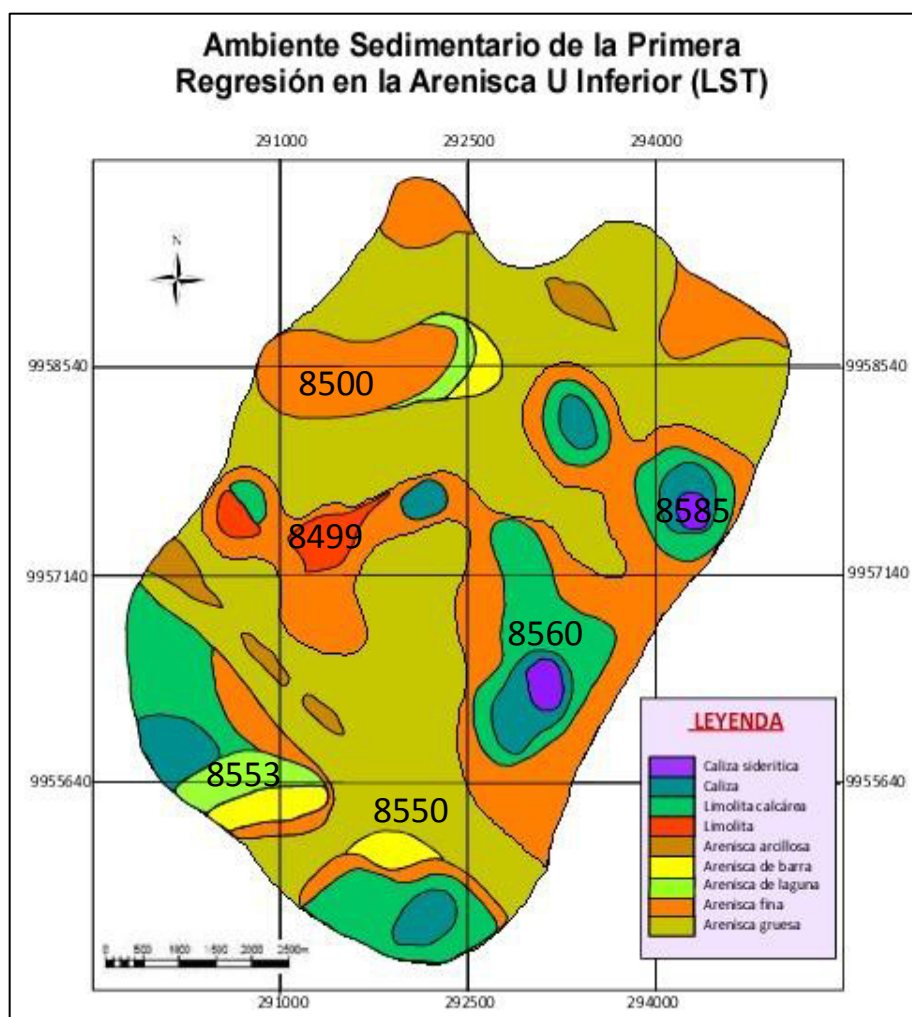
En las zonas más profundas hay corrientes muy fuertes que pueden retener materiales finos, encontrándose a niveles de marea baja (Mapa V).



Mapa V Mapa de una Transgresión (TST) en la Arenisca U Inferior.  
**Fuente:** Elaborado en el graficador Canvas 15.

### 5.1.5 Primera Regresión de la Arenisca U Inferior (LST)

Canales que van del este hacia el oeste, con arenas más finas al borde, donde aparecen relieves (barras) y detrás están las lagunas con las calizas, se levanta el mudflat (sedimentación que alcanza solo la marea alta) (Mapa VI).



Mapa VI Mapa de una Regresión (LST) en la Arenisca U Inferior.

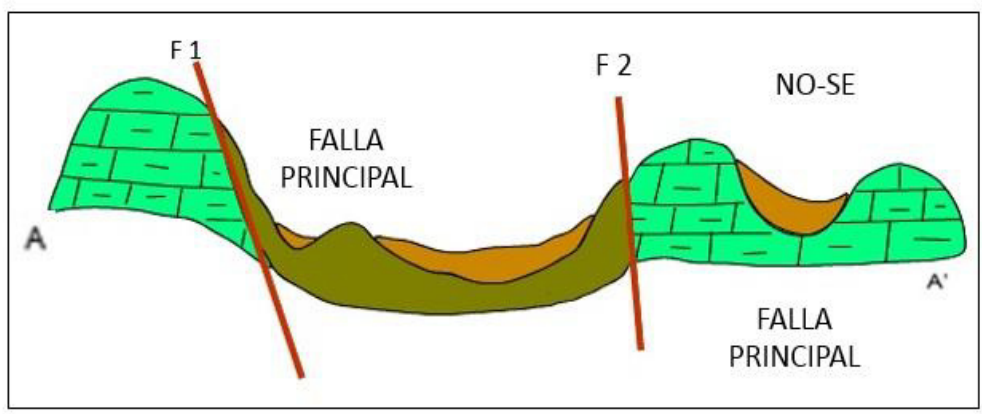
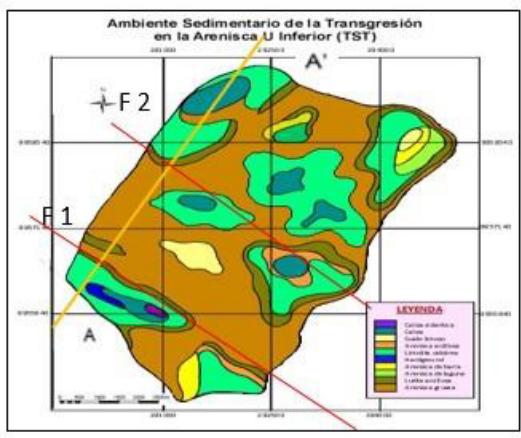
**Fuente:** Elaborado en el graficador Canvas 15.



## **5.2 Corte estratigráfico en la Transgresión de la Arenisca U Inferior (TST)**

Se observa dos fallas laterales una principal y otra secundaria (normales), en Orientación del graben (NE-SO) perteneciente al Jurásico antes de la inversión tectónica. Dando una estructura Pull Apart, como resultado del desplazamiento rápido de las fallas hacia el NO produciendo un hundimiento y reactivando viejas fallas jurásicas que son perpendiculares a las principales. El LST está representado por el canal principal, seguido de la falla secundaria que desplazó un pequeño canal, observándose en el pequeño hundimiento.

Después se encuentra la plataforma submarina con material calcáreo (calizas) (Mapa VII).



Mapa VII Corte Estratigráfico de SO-NE en el TST se observa las estructuras (fallas) por reactivación  
**Fuente:** Elaborado en el graficador Canvas 15.

# CAPÍTULO 6

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

1. En este trabajo se utilizaron ciclos sedimentarios menores para obtener mejor información de los materiales detríticos que los registros eléctricos no resuelven.

2. Utilizando la suavización de curvas con Series de Fourier se observa que se acentúan las funciones de seno y coseno, haciendo más fácil la identificación de las inflexiones para definir regresiones y transgresiones.

3. Al Oeste del Campo Sacha, se han determinado fallas con dirección NE-SO, generadas en la zona del anticlinal, evidenciadas en el corte estratigráfico presentado en este trabajo.

4. Los mapas de ambientes sedimentarios evidencian dos eventos principales en la arenisca U: la arenisca U inferior pertenece a un ambiente estuarino de poca profundidad dominado por mareas que evoluciona a deltaico, donde existe la predominancia de areniscas de canal; y la arenisca U superior pertenece a un ambiente estuarino profundo dominado por mareas donde predominan sedimentos finos como lutitas, limos y calizas.

5. La arenisca U inferior muestra en la mayoría de los pozos tres ciclos sedimentarios: dos regresivos y uno transgresivo. Sin embargo, varios pozos no mostraban este evento transgresivo que separa los dos regresivos, esto puede deberse a eventos tectónicos sin-sedimentarios que generaron estructuras falladas sin-sedimentarias con un mayor espacio de acomodamiento en donde se depositó un mayor espesor de arena de manera más continua con una dirección preferencial NE-SO.

## 6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda procesar los datos de varianza en valores comprendidos entre 15 y 27 frecuencias.
2. Si no existe concordancia entre las facies que deberían aparecer a cierta profundidad, es recomendable procesar otra vez el archivo .las con nuevos datos del número de facies.
3. Al momento de recrear los ambientes hay que considerar bien la proporción de cada facie en un horizonte, para tener una mejor idea de la tendencia de las barras o canales.
4. Las facies que se presentan en la Arenisca U Inferior siempre van a tener una mayor proporción que la Arenisca U Superior y será un poco complicado determinar con exactitud cuál es la arena predominante porque hay una agrupación de todas.
5. Es preferible asignar un espesor de 30 ft para la Arenisca U Superior considerando el límite del HST, por lo general las lutitas arcillosas dan un indicio que podríamos encontrarnos en el tope.

# **ANEXOS**

## BIBLIOGRAFÍA

1. BABY, P. BARRAGÁN, R. RIVADENEIRA, M. La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. Petroecuador, Alpallana E 8-86 y Av. 6 de diciembre.
2. CATUNEANU, O. Principles of Sequence Stratigraphy (First Edition), 2006. Canadá Elsevier.
3. D. MIALL, A. Principles of Sedimentary Basin Analysis (First Edition), 1984. New York, Springer Verlag.
4. GERHARD, E. Sedimentary Basins - Evolution, Facies, and Sediment Budget (Second, Completely Revised and Enlarged Edition), 2000. Germany: Springer.
5. HALLIBURTON. "Modelamiento estático y dinámico de los reservorios Hollín, U, T y Basal Tena, del Campo Sacha", 2013.
6. ORDÓÑEZ, R. Análisis de las perforaciones horizontales de los campo Sacha y Shushufindi de Petroproducción. (Tesis de tercer nivel, Escuela Politécnica Nacional, 1997).

7. PÉREZ, M. Modelo Estratigráfico por Ciclos Sedimentarios Menores de la Arenisca U de la Zona Sur en el Campo Sacha. (Tesis de tercer nivel, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2013).
  
8. RUIZ, J. SANTANA, T. Determinación del diámetro de las gargantas porales y presiones capilares usando el equipo de presión capilar con picnómetro de mercurio para la caracterización del reservorio Arenisca U del campo Auca, mediante pruebas de laboratorio. (Tesis de tercer nivel, Escuela Politécnica Nacional, 2012).



DATOS DE LOS POZOS PROCESADOS EN EL PROGRAMA PETREL, SE OBSERVA LA COLUMNA DE PROFUNDIDAD DE AGUA, FACIES Y LAS CURVAS SUAVIZADAS.

