

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DEL EXPONENTE DE HURST MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RANGO RE-ESCALADO EN REGISTROS DE POZOS DE LA CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Torres L. Laura
para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, Noviembre del 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DEL EXPONENTE DE HURST MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RANGO RE-ESCALADO EN REGISTROS DE POZOS DE LA CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Víctor Casas

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Torres L., Laura
para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, Noviembre del 2007

Caracas, 16 noviembre de 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Torres Laura, titulado:

“Determinación de Exponente de Hurst Mediante el Análisis de Rango Re-escalado en Registros de Pozos de la Cuenca Oriental de Venezuela”

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

Prof. José Cavada
Miembro del Jurado

Prof. Antonio Ughi
Miembro del Jurado

Prof. Víctor Casas
Tutor Académico

*A mis Padres sin cuyo amor,
apoyo incondicional y consejos
no habría sido posible llegar
a la culminación de esta meta
A mi hermano por existir y ser
la alegría de mi hogar.*

Agradecimientos

A la magna casa de estudios *Universidad Central de Venezuela*, que me acogió durante mis años de estudiante y que me permitió crecer como persona y como profesional.

A Paradigm Geophysical de Venezuela C.A, por las licencias educativas otorgadas la Escuela de Geofísica de la Universidad Central de Venezuela.

A mi tutor Víctor Casas, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto. Por su invaluable dedicación y apoyo incondicional, claves para la realización de este trabajo.

A Esteban Díaz y la Sr. Olga por aparecer en el preciso momento y prestarme toda su colaboración.

A mi madre por ser el pilar fundamental en mi vida. Por estar conmigo siempre, apoyándome en los peores momentos, alentándome a seguir. Gracias por ser el faro que me guía en la oscuridad, llevándome siempre a puerto seguro.

A mi padre por creer en mí y estar dispuesto a hacer cualquier sacrificio por mi bienestar, porque sin su amor, comprensión y apoyo incondicional no podría haber alcanzado esta meta.

A mi hermano que es la luz de mis ojos, que a pesar de su corta edad, me brindo todo su apoyo y colaboración en todo el transcurso de la elaboración de este trabajo.

A mis tías Ana y Nina por todo el cariño que siempre me han brindado. A mis primos y en especial a Andi que aunque físicamente no este, siempre estarás presente para mí.

A mi madrina Edith, por ser mi amiga, gracias por estar conmigo todos estos años, por aconsejarme, regañarme, compartir risas y llantos en todo este tiempo.

A mis amigas Miriam, Yerli, Lusma, Whenddy, Prin y Caro por todos esos buenos momentos compartidos.

A todos mis amigos de la universidad: Emgelberth, Oscar, Marianne, Liz, Pepi, José Francisco, Pabo y muchos otros, por permitirme conocerlos y ser parte de su vida. Por ayudarme y estar conmigo a lo largo de la carrera, y aun después...

Torres L., Laura N.
**DETERMINACIÓN DEL EXPONENTE DE HURST MEDIANTE
EL ANÁLISIS DE RANGO RE-ESCALADO EN REGISTROS DE
POZOS DE LA CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA**

**Tutor Académico: Prof. Víctor Casas. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica (Ingeniería Geofísica). Año
2007, 117 pag.**

Palabras Claves: Geometría fractal, Exponente de Hurst, Método *R/S*, Registros de pozo, Volúmenes geoestadísticos.

Resumen:

La geometría fractal suministra una descripción matemática para la mayoría de los procesos aparentemente complejos que se dan lugar en la naturaleza. En geofísica, procesos como fluctuaciones del nivel del mar y la tasa de sedimentación (factores básicos en las secuencias estratigráficas) constituyen eventos naturales que poseen un comportamiento fractal en el dominio del tiempo.

En el presente trabajo se utiliza el método de Análisis de Rango Re-escalado (*R/S*), creado por H. Hurst (1951, 1956), para determinar el Exponente de Hurst (*H*) en registros de pozos con el fin de asociarlos con las propiedades estratigráficas de una zona en la Cuenca Oriental de Venezuela.

Los registros considerados para el Análisis de *R/S* fueron: potencial espontáneo, permeabilidad y rayos gamma. Se analizaron los registros de: Potencial Espontáneo, Permeabilidad y Rayos Gamma de 79 pozos, donde todos presentaron un comportamiento fractal antipersistente (un proceso antipersistente, es aquel, en donde una tendencia de aumento en el pasado implica una tendencia a disminuir en el futuro y viceversa, es decir procesos de correlación negativa).

El registro de permeabilidad muestra los valores de *H* más alto del estudio, con un valor promedio cercano de 0.3, mientras que los valores de *H* pertenecientes a los registros de potencial espontáneo y rayos gama presentan valores más bajos de *H*.

Se generó un volumen geoestadístico basado en los datos obtenidos de exponente de Hurst (provenientes del GR), con la finalidad de obtener un mejor entendimiento del comportamiento fractal de las propiedades litológicas (y por tanto de la sedimentación). En este volumen geoestadístico se observaron principalmente dos zonas con una fuerte evidencia en la variación del exponente de Hurst.

La primera zona se ubica en un intervalo de profundidad aproximado de 1500m a 2400m. Este intervalo de profundidad corresponde a la Formación Oficina. Los valores de *H* en esta zona oscilan entre 0.20 y 0.04. La gran variación que se observa de *H* puede estar relacionada con el proceso de sedimentación de esta formación, que se encuentra regido por alternancias repetidas de ambientes marinos

de aguas someras, marino salobre y deltaico superior, lo que representa un área subsidente de muy bajo relieve a través de lo cual los mares avanzaron y se retiraron alternativamente.

La segunda zona se ubica aproximadamente desde los 400m a los 1500m de profundidad, correspondiendo este intervalo a la Formación Freites. El comportamiento del exponente de Hurst, es más constante que el comportamiento observado en la zona descrita anteriormente. En este caso los valores de H se encuentran en un rango de valores mucho menor, que va desde 0.22 a 0.14, esta variación menor en los valores de H podría corresponderse al proceso de sedimentación que dio origen a la Formación Freites. A diferencia de la formación anterior, está representa un ambiente marino somero en su parte inferior pasando a ambientes de aguas un poco más profundos.

En este estudio los ambientes marinos poseen valores de exponente Hurst entre 0.16 y 0.22. Mientras que ambientes delataicos superior, llanuras de inundación y pantanosos poseen valores de exponente de Hurst entre 0.06 y 0.16.

INDICE

	Pag.
Constancia de Aprobación.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Indice.....	viii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tablas.....	xiii
Capítulo I.....	1
I.1 Introducción.....	1
I.2 Objetivos.....	2
I.2.1 General.....	2
I.2.2 Específicos.....	2
Capítulo II.....	3
II.1 Ubicación de la Zona de Estudio.....	3
II.2 Geología Regional.....	4
II.2.1 Subcuenca de Guárico.....	5
II.2.2 Subcuenca de Maturín.....	6
II.3 Estratigrafía Regional.....	7
II.4 Principales formaciones productoras.....	7
II.5 Geología Local.....	9
II.5.1 Formación Oficina.....	9
II.5.1.1 Edad.....	10
II.5.1.2 Paleoambientes.....	10
II.5.1.3 Litología.....	11
II.5.2 Formación Freites.....	12

II.5.2.1 Edad.....	13
II.5.2.2 Paleoambientes.....	13
II.5.2.3 Litología.....	14
Capítulo III.....	15
III.1 Geometría fractal.....	15
III.1.1 Historia de los fractales.....	15
III.1.2 Mandelbrot Benoit y los fractales.....	17
III.2 Fractales.....	18
III.3 Dimensión fractal.....	20
III.4 Tipos de fractales.....	23
III.5 Fractal Autoafín.....	24
III.6 Serie de Tiempo.....	25
III.6.1 Movimiento Browniano.....	28
III.6.1.1 Movimiento Browniano Fraccional.....	30
III.6.1.2 Movimiento Fraccional Gaussiano.....	34
III.7 Fractales de los registros de pozos.....	35
III.8 Análisis de Rango Reescalado.....	36
III.8.1 Análisis de Rango Re-escalado aplicado a Series de Tiempo.....	38
III.9 Naturaleza Fractal de los sedimentos.....	40
Capítulo IV.....	43
IV.1 Registros de Pozos.....	43
IV.1.1 Registros de Rayos Gamma.....	45
IV.1.2 Registro de Potencial Espontáneo.....	48
IV.1.3 Registro de Resistividad.....	49
IV.1.4 Registro de Inducción.....	50
IV.1.5 Registro de Densidad.....	51
IV.1.6 Registro Sónico.....	53
IV.1.7 Registro Neutrónico.....	54

Capítulo V.....	56
V.1 Metodología de trabajo.....	56
V.1.1 Revisión bibliográfica.....	56
V.1.2 Creación y diseño del algoritmo en Matlab.....	58
V.1.2.1 Optimización de los códigos.....	58
V.1.3 Compilación, edición y normalización de registros de pozos.....	67
V.1.4 Determinación del Ancho de Ventana y Desplazamiento.....	69
V.1.5 Corrida del Programa y Suavizado de Las Curvas.....	70
V.1.6 Generación de Volumen Geoestadístico de Exponente de Hurst.....	71
V.1.6.1 Geoestadística.....	71
V.1.6.2 Fases en un estudio geoestadístico.....	72
Capítulo VI.....	82
V.I.1 Resultados y análisis de resultados.....	82
V.I.1.1 Presentación de las diferentes curvas de H vs profundidad.....	82
Pozo003.....	82
Pozo024.....	85
Pozo059.....	87
Pozo099.....	89
Pozo123.....	91
V.I.1.2 Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst.....	96
Pozo153.....	96
Pozo059.....	98
Pozo028.....	101
Conclusiones y Recomendaciones.....	111
Referencias Bibliográficas.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura N°	Pág.
2.1 Mapa de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela.....	3
2.2 Corte Geológico Conceptual Norte Sur.....	5
2.3 Corte Geológico Conceptual Noreste-Sureste.....	6
2.4 Columna Estratigráfica de Venezuela.....	8
2.5 Ubicación Geográfica de la Formación Oficina.....	9
2.6 Marco Geológico Regional para la Sedimentación en Venezuela.....	11
2.7 Ubicación Geográfica de la Formación Freites.....	13
3.1 Algunos de los Fractales más Conocidos.....	16
3.2 Ejemplos de Fractales en la Naturaleza.....	19
3.3 Esquema Comparativo entre las Dimensión Euclidiana y Fractal.....	21
3.4 Fractales no Lineales.....	23
3.5 Fractales Plasmáticos.....	24
3.6 Trayectoria de Irregularidad que sigue una Partícula Browniana.....	29
3.7 Simulación del Movimiento Browniano.....	29
3.8 Comportamiento de Procesos Persistente, Antipersistente y Aleatorio.....	32
3.9 Análisis de Rango Re-escalado.....	38
3.10 Sistemas de Cortejo o “Systems Tracts”.....	42
4.1 Esquema de un Pozo de Petróleo Indicando los Parámetros Físicos obtenidos de los Registros.....	44
4.2 Correlación entre el Registro Gr y la Litología.....	47
4.3 Diagrama de Obtención de Sp.....	48
4.4 Registro de Resistividad.....	49
4.5 Principios Básicos de la Medición de Registros de Inducción.....	50
4.6 Herramienta de Densidad Compensada.....	52
4.7 Dispositivo de Registro Sónico.....	53
4.8 Herramienta Neutrónica Compensada.....	55

5.1	Esquema de la Metodología.....	57
5.2	Diagrama de Flujo del Programa.....	59
5.3	Lectura de los Datos.....	60
5.4	Elección de Rango de Interés.....	61
5.5	Despliegue del Registro de Pozo.....	62
5.6	Elección de Registro, Ventana y Desplazamiento.....	64
5.7	Gráfica de $\log R/S$ vs. $\log N/2$	64
5.8	Gráfica de Salida En Pantalla de H y profundidad.....	65
5.9	Gráfica del Exponente de Hurst vs profundidad.....	66
5.10	Mapa con la distribución de los Pozos Escogidos.....	68
5.11	Comportamiento de la Curva H para Valores Distintos de Ventana.....	69
5.12	Comparación entre Curva Suavizada y la misma Curva sin Suavizar.....	70
5.13	Secuencia Sedimentaria.....	75
5.14	Generación del Modelo Geométrico.....	77
5.15	Proceso de Propagación Uniforme.....	78
5.16	Carga en el Programa Geostatistical Volume Creation de los Valores de H	79
5.17	Ubicación de los 16 Pozos Usados para Generar el Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst.....	80
5.18	Semivariograma.....	81
6.1	Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo003.....	83
6.2	Grafico de H vs profundidad del Pozo003.....	84
6.3	Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo024.....	85
6.4	Grafico de H vs profundidad del Pozo024.....	86
6.5	Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo059.....	87
6.6	Grafico de H vs profundidad del Pozo059.....	88
6.7	Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo099.....	89
6.8	Grafico de H vs profundidad del Pozo099.....	90
6.9	Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo123.....	91
6.10	Grafico de H vs profundidad del Pozo123.....	92

6.11	Mapa con la Ubicación de los Pozos Descritos.....	93
6.12	Mapa con la Ubicación del Pozo153.....	97
6.13	Imagen del Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst asociado Al Crossline 252.....	98
6.14	Mapa con la Ubicación del Pozo059.....	99
6.15	Imagen del Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst asociado Al Crossline 376.....	100
6.16	Imagen del Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst asociado Al Inline 132.....	100
6.17	Mapa con la Ubicación del Pozo 028.....	101
6.18	Imagen del Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst asociado Al Inline 132.....	102
6.19	Imagen para una Profundidad de 1570m del Volumen Geoestadístico.....	105
6.20	Imagen para una Profundidad de 1540m del Volumen Geoestadístico.....	106
6.21	Imagen para una Profundidad de 1530m del Volumen Geoestadístico.....	106
6.22	Imagen para una Profundidad de 1460m del Volumen Geoestadístico.....	107
6.23	Imagen para una Profundidad de 1440m del Volumen Geoestadístico.....	107
6.19	Imagen para una Profundidad de 1430m del Volumen Geoestadístico.....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla N°	Pag.	
3.1	Clasificación del rfG según el valor de H.....	3
5.1	Potenciales problemas de los registros de Poz.....	76

CAPÍTULO I

I.1 Introducción

En los últimos años se ha reconocido la importancia de la Geometría de Fractales en las ciencias naturales como apropiadas para describir las estructuras presentes en la naturaleza; las nubes, la topografía y terremotos son ejemplos de fractales. Los conjuntos fractales se han aplicado en las áreas de la ciencia del petróleo y ciencias de la tierra para modelar características geométricas, señales geofísicas, fenómenos difusivos, etc (Mandelbrot, 1983).

El mejoramiento en el proceso de caracterización de reservorios puede arrojar beneficios hacia el modelado y desarrollo de los mismos. Desafortunadamente, no es posible describir por completo la variabilidad de los yacimientos, debido a que la esencia en la reconstrucción de estos reservorios de hidrocarburos es mediante las mediciones de los registros de pozos y de los datos sísmicos 2D y 3D, los cuales poseen información en distintas escalas de resolución espacial. Los primeros proveen mediciones en detalles cercanos a 0.5', mientras que los segundos proveen información entre 30 y 80m dependiendo del espectro de frecuencia en la adquisición sísmica.

Una manera de integrar las diferentes escalas de información, es teniendo en cuenta la variación en el tiempo y espacio de las propiedades medidas, tanto por los registros de pozos, como por la sísmica 2D y 3D. Esto es precisamente la base de las técnicas analíticas de la Geometría Fractal; este método es especialmente útil para describir las heterogeneidades espaciales de los modelos geológicos.

La geometría fractal permite observar un orden implícito en las formas naturales (aparentemente caóticas) de los datos geofísicos. La aplicación de estas nuevas técnicas a la geología del petróleo, permite la simulación fractal de los depósitos fracturados, determinar el comportamiento fractal de las estructuras así como las propiedades sedimentológicas (Brabon y La pointe, 1995).

Este trabajo se basa en la aplicación del análisis de rango re-escalado en registros de pozos. Los datos de pozos son usados como mediciones de las propiedades temporales del reservorio, esto permite observar el comportamiento fractal de las diferentes propiedades medidas. De esta forma es posible establecer patrones de comportamiento para cada área en particular y a su vez, correlacionar estos patrones con los procesos de sedimentación presentes en la zona de estudio.

I.2 Objetivos

Este trabajo contempla los siguientes objetivos:

I.2.1 General

Determinar la variación en profundidad del Exponente de Hurst, mediante el análisis de rango reescalado creado por H. E. Hurst (1951, 1956) en una zona de la Cuenca Orienta de Venezuela, específicamente en la Formación Oficina.

I.2.3 Específicos

- Creación y diseño de un algoritmo en Matlab, para realizar el cálculo del Coeficiente de Hurst.
- Determinar si los registros de: Rayos Gamma, Potencial Espontáneo y Permeabilidad poseen comportamiento fractal, de ser así calcular el exponente de Hurst.
- Verificar si a lo largo de la columna estratigráfica el coeficiente de Hurst varía y es correlacionable con la estratigrafía de la zona.
- Generar un volumen geostadístico de coeficiente de Hurst para una mejor visualización de la correlación.
- Determinar los valores de Hurst que puedan indicar algún tipo de patrón o ambiente sedimentario.

CAPÍTULO II

II.1 Ubicación de la zona de Estudio

El área de estudio del presente trabajo se encuentra localizada en la Cuenca Oriental de Venezuela, en las Formaciones Freites y Oficina. Por motivos de confidencialidad, no se suministrará la ubicación precisa de la zona de análisis.

Geográficamente la Cuenca Oriental de Venezuela tiene una longitud de más de 600km en dirección este-oeste, con un ancho promedio de 200km en norte-sur; abarca una superficie de 164000Km², que la hace la primera en extensión en Venezuela. Comprende los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro. Topográficamente se caracteriza por extensas llanuras. (Figura. 2.1).

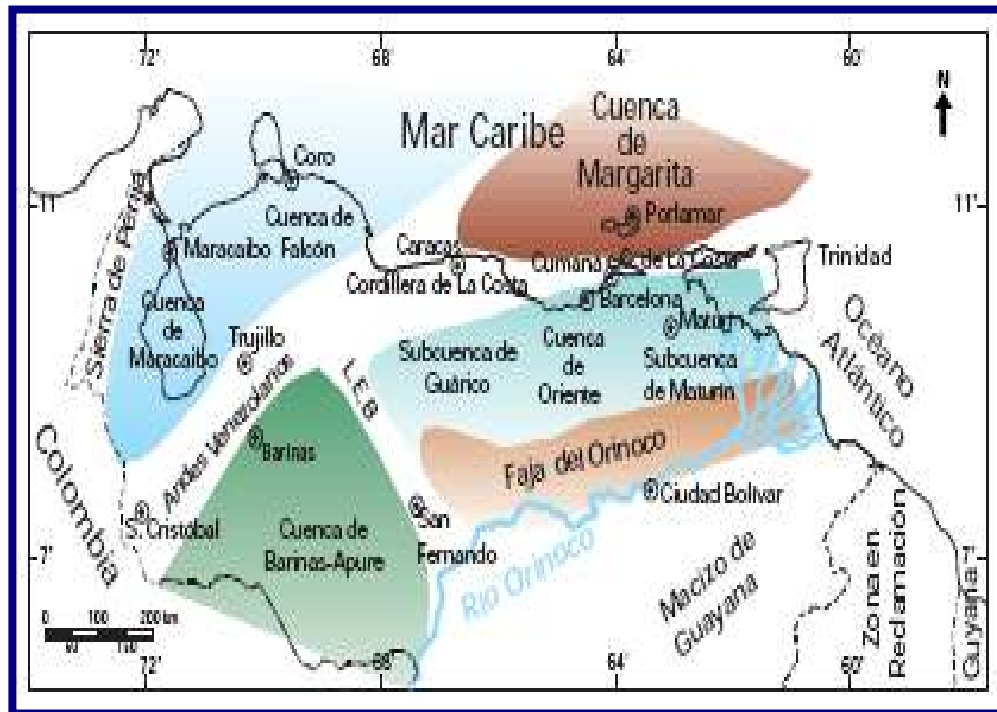


Figura 2.1. Cuencas petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus Provincias Sedimentarias (Tomado de La WEC 1997).

II.2 Geología Regional

La Cuenca Oriental de Venezuela contiene más de 6096 m de sedimentos paleozóicos, cretáceos y terciarios entre las cadenas montañosas terciarias, situadas al norte. Las secciones sedimentarias constan casi exclusivamente de areniscas y lutitas, con edades que van desde el Triásico-Jurásico al Pleistoceno (WEC, 1997).

La cuenca es asimétrica, con el flanco sur buzando suavemente hacia el norte, hasta que es intersectada por una zona de complejas perturbaciones tectónicas y plegamientos que constituyen el flanco norte. Toda la cuenca se inclina hacia el este, de manera que la parte más profunda de ella se encuentra al noreste, hacia Trinidad, donde se estima que pueden haberse acumulado 12192 m de sedimentos.

Los yacimientos petrolíferos se encuentran generalmente al norte de las fallas. El entrapamiento se lleva a cabo mediante mecanismos estructurales-estratigráficos, los cuales pueden ser resumidos de la siguiente manera:

- ❖ Una falla normal al sur.
- ❖ Buzamiento regional hacia el noreste.
- ❖ Acuñaamiento arenoso lateral.

Estas son las condiciones que caracterizan a las típicas trampas de la Formación Oficina. Hacia el extremo oriental de la cuenca las trampas presentan mayores complejidades estructurales y estratigráficas, en particular en los campos próximos al frente de montaña (WEC, 1997).

La Cuenca Oriental de Venezuela ha sido subdividida operacionalmente en dos subcuencas: la de Guárico y la de Maturín.

II.2.1 Subcuenca de Guárico

La subcuenca de Guárico comprende los campos del Estado Guárico y parte del norte del Estado Anzoátegui. El flanco norte de la subcuenca se encuentra asociado al frente de deformación donde se ubica el sistema de fallas de Guárico (Figura 2.2.), el cual sobrecarga rocas cretácicas y terciarias, produciendo un marco tectónico complejo. Hacia el sur, la estructura es más sencilla, con evidencias de depresiones estructurales en las que se conservaron rocas jurásicas y paleozoicas y con un acuñamiento de las secuencias cretácicas y terciarias en la misma dirección. Las principales trampas son combinaciones de tipo estructural y estratigráfico en los campos alejados del frente de corrimientos (WEC, 1997).

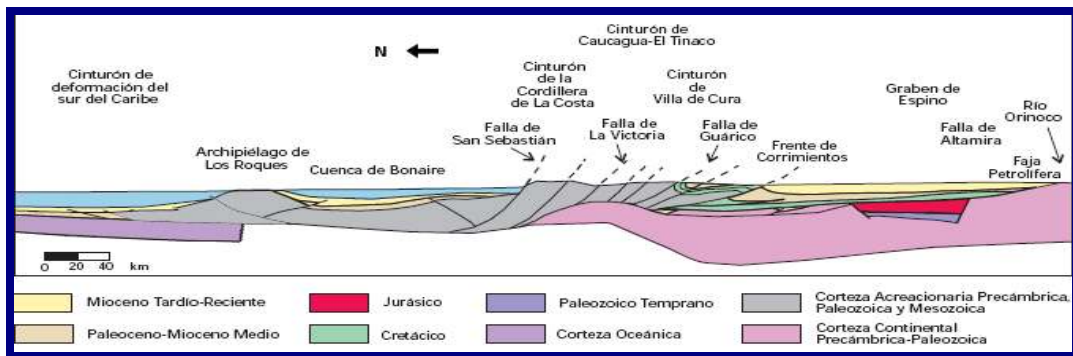


Figura 2.2. Corte geológico conceptual norte-sur desde el cinturón de deformación del Caribe en Curazao hasta el Río Orinoco. El Sector de la Cuenca Oriental que muestra el corte pertenece a la Subcuenca de Guárico; nótese cómo el Cretácico y el Terciario de la Cuenca Oriental son cabalgados por el frente de corrimientos (Tomado del WEC, 1997).

La subcuenca de Guárico presenta un marco geológico complejo en lo que respecta a los sistemas petroleros. En esta subcuenca se reconocen los siguientes sistemas:

- ❖ Querecual–Oficina.
- ❖ Temblador–La Pascua.
- ❖ Querecual–Chaguaramas.
- ❖ Oficina.

II.2.1 Subcuenca de Maturín

La Subcuenca de Maturín constituye la principal unidad petrolífera de la Cuenca Oriental. Se podría afirmar que la deformación estructural y los acunamientos de las unidades estratigráficas hacia el sur definen dos dominios operacionales: uno al norte del Corrimiento de Pirital y otro al sur (Figura 2.3).

La estratigrafía de la Serranía del Interior Oriental representa, en buena parte la sedimentación del flanco norte de la Subcuenca de Maturín: una espesa y compleja secuencia sedimentaria que abarca desde el Cretácico Inferior hasta el Pleistoceno. El flanco sur, en cambio, presenta una estratigrafía más sencilla semejante a la estratigrafía de la subcuenca de Guárico, con el Grupo Temblador en su parte inferior, como representante del Cretácico, y un terciario suprayacente de edad fundamentalmente Oligoceno-Pleistoceno, en el que se alternan ambientes fluvio-deltáicos y marinos someros, hasta su relleno final de ambientes continentales (WEC, 1997).

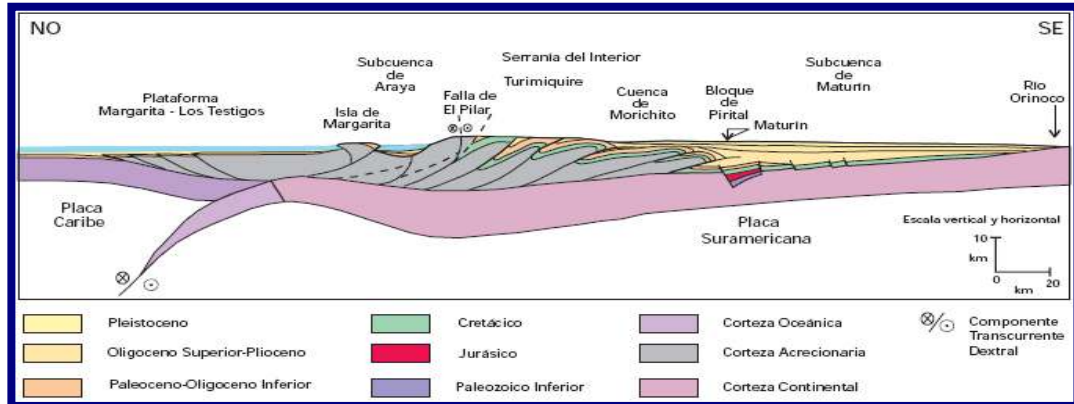


Figura 2.3. Corte geológico conceptual noroeste-sureste desde la Plataforma Margarita-Los Testigos hasta el Río Orinoco. El flanco norte de la Subcuenca de Maturín se encuentra asociado a los frentes de corrimiento de grandes bloques corticales, desplazados hacia el sur por la colisión entre las placas Caribe y Suramericana. (Tomado del Wec, 1997).

Los principales sistemas petroleros de la subcuenca de Maturín son:

- ❖ Sistema Guayuta-Oficina.
- ❖ Sistema Guayuta-Caripa.

II.3 Estratigrafía Regional

Las formaciones que comprenden la Cuenca Oriental se encuentran representadas en la columna estratigráfica tomado del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1980) (Figura 2.4). Se inicia en el Paleózoico, con la Formación Hato Viejo de edad Devónico, depositada en discordancia sobre el basamento Precámbrico y la Formación Carrizal, suprayacente, de edad Carbonífero (Wec, 1997).

Discordante a está se encuentra el Grupo Temblador del Cretácico Medio con las formaciones Canoa y Tigre de edad Aptiense-Santonienne. Una nueva discordancia en el Cretácico superior pone en contacto la secuencia marina de San Juan, Vidoño y Caratas, del Cretácico Superior al Eoceno Medio. Sobre la discordancia del Eoceno se deposita la secuencia transgresiva representada por las formaciones Merecure, Oficina y Freites del Cenozoico Medio, de edad Oligo-Mioceno Medio y en concordancia con ellas termina la sedimentación con la depositación de los sedimentos continentales de Las Piedras y Mesa de edad Mio – Pleistoceno.

II.4 Principales formaciones productoras.

Las principales formaciones productoras presentes en la Cuenca Oriental son Oficina y Merecure, que fueron sedimentadas en ambientes transgresivos sobre el flanco sur de la cuenca, y presentan muy bajo relieve en ambientes de llanuras deltáicas con extensas áreas pantanosas, abundante vegetación, intercalaciones de aguas salobres y sistemas de caños de dirección generalizada al Norte y ocasionales incursiones de agua marina. Además, presentan un engrosamiento de sur a norte y desaparición de las arenas hacia el noreste (González de Juana, 1980).

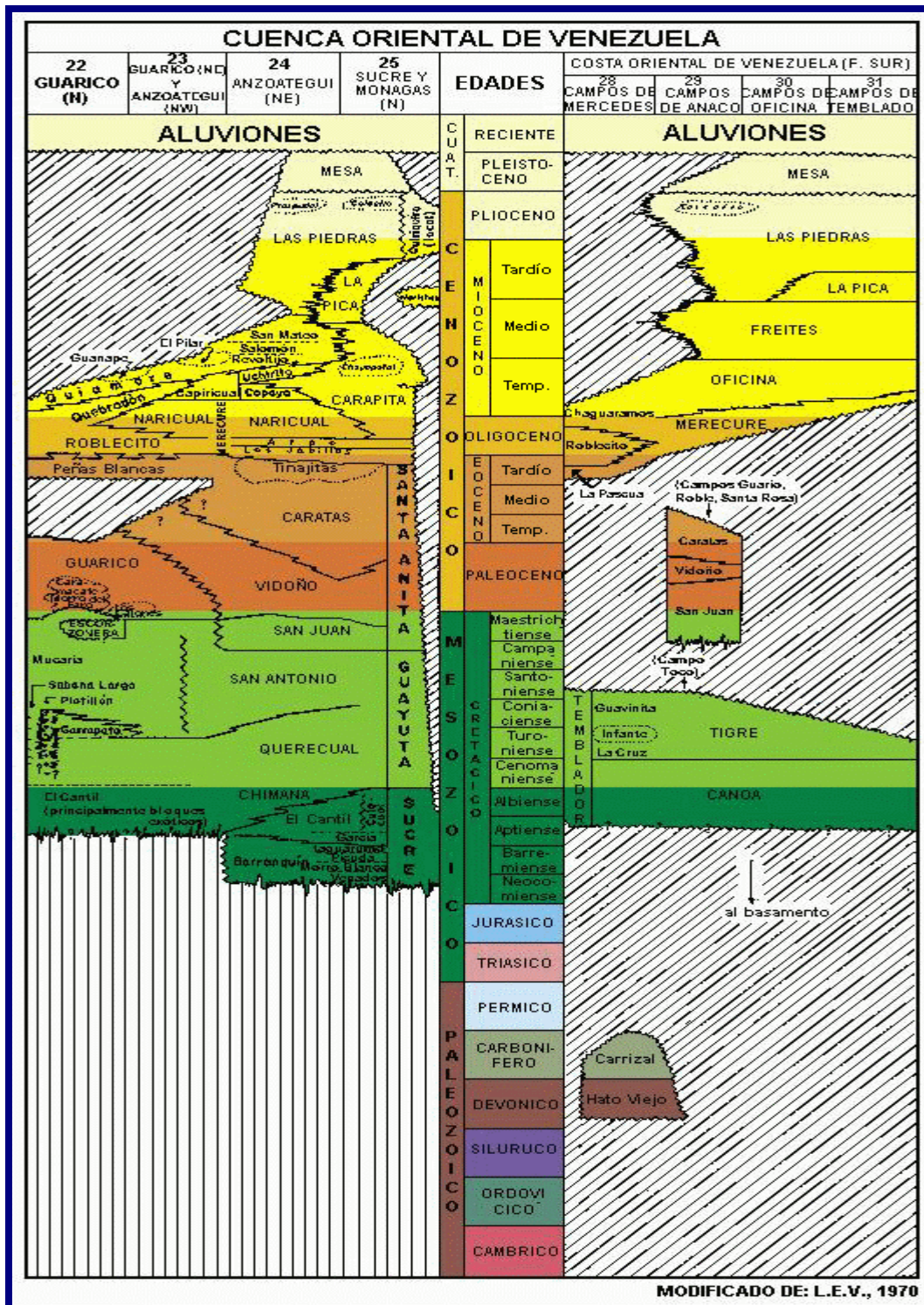


Figura 2.4. Columna estratigráfica de la Cuenca Oriental de Venezuela (tomado del léxico estratigráfico, 1980).

II.5 Geología Local

II.5.1 Formación Oficina

La Formación Oficina (Hedberg, 1947) tiene su localidad tipo en el pozo Oficina-1, en el Distrito Freites del Estado Anzoátegui y sólo aflora en los domos de Santa Ana y San Joaquín, constituye los principales yacimientos petrolíferos en la región de Anaco-Oficina-Temblador, se dividen en tres áreas mayores que son **Área Mayor de Anaco, Área Mayor de Oficina y Temblador** (Figura 2.5). La Formación Oficina, también se encuentra presente en la Faja Petrolífera del Orino, Audemar (1985) la divide en tres unidades: la Unidad I (Miembro Morichal del área de Cerro Negro; Formación Oficina Inferior en Zuata); la Unidad II (Miembro Yabo del área de Cerro Negro; Formación Oficina Media en Zuata); la Unidad III (miembros Jobo y Pílon del área de Cerro Negro; Formación Oficina Superior de Zuata).

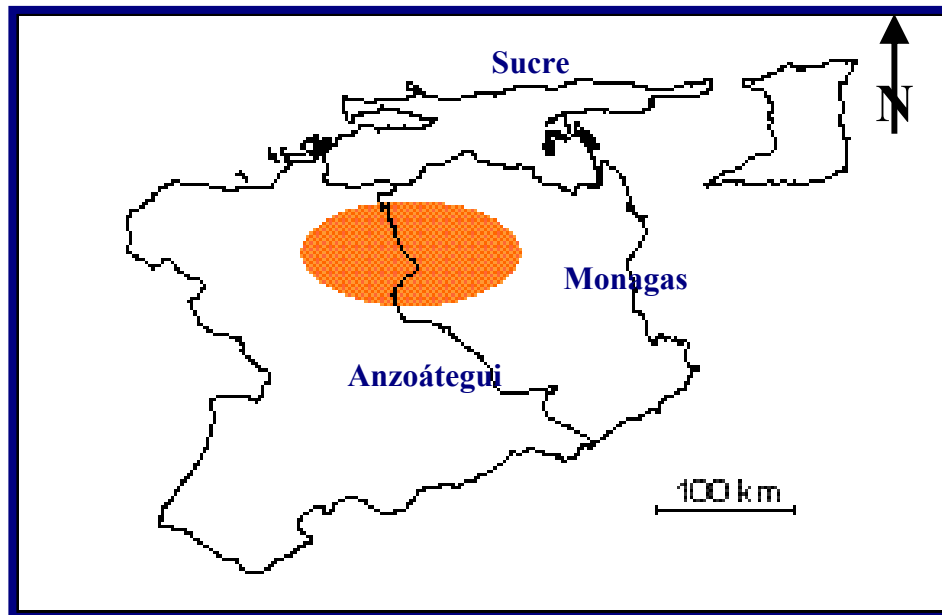


Figura 2.5. Ubicación Geográfica de la Formación Oficina (tomado del léxico estratigráfico, 1980).

II.5.1.1 Edad

Hedberg *et al.* (1947) la consideran del Oligoceno-Mioceno. Audemar *et al.* (1985) señalan que el pico máximo de transgresión observado en la Unidad II de la faja petrolífera del Orinoco, tiene una edad Mioceno medio temprano, mientras que los clásticos basales de la Unidad I, pudiesen corresponder a la parte superior del Mioceno inferior. Lorente (1980) asigna una edad Mioceno inferior a medio para la Formación Oficina, en varios pozos de la cuenca oriental (Léxico Estratigráfico, 1980).

II.5 1. 2 Paleoambientes

Para algunos geólogos como Hedberg (1947) la sedimentación de la Formación Oficina se inicia en condiciones de agua dulce a salobre, continuando con repetidas alternancias de ambientes marinos someros, salobres y pantanosos. Sin embargo, geólogos como González de Juana *et al.* y Méndez (1985) consideran que la Formación Oficina representa una sedimentación deltáica gigantesca y compleja, tipo Delta del Orinoco en la actualidad, pero con orientación sur-norte. Para Campos *et al.* (1985) la Formación Oficina al norte del corrimiento de Anaco se depositó en condiciones marinas marginales a neríticas, con una mayor influencia en la parte media de la formación. Al norte del Área Mayor de Oficina, la Formación Oficina representa ciclos repetitivos caracterizados por transgresiones marinas asociados a progradaciones de la plataforma continental.

Debido a que el ambiente de depósito de la formación Oficina varía de un marino somero a deltáico superior, observamos variaciones laterales rápidas con la presencia contemporánea de canales arenosos, depósitos detríticos de desbordamiento y depósitos arcillosos de llanura de inundación. Estas variaciones laterales involucran cambios de las características petrofísicas relacionados con la litología y, por lo tanto, con el nivel de energía de depósito en un mismo nivel estratigráfico, lo que implica variaciones laterales y horizontales de las características petrofísicas de los yacimientos con posibilidades de trampas estratigráficas.

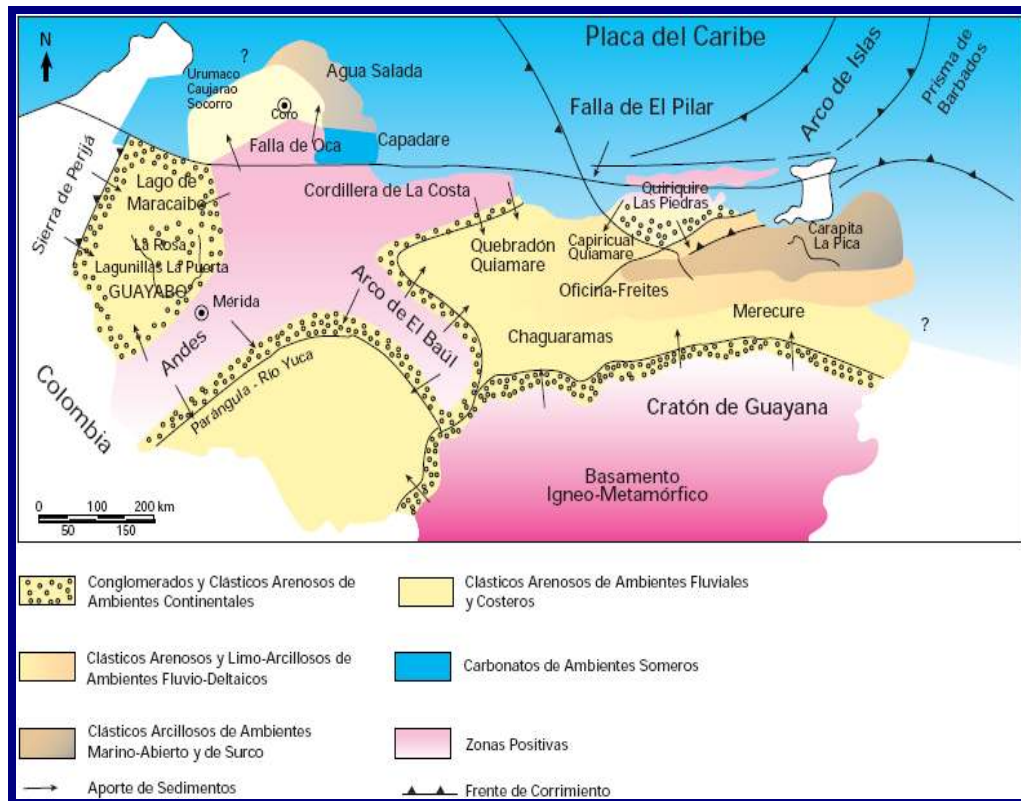


Figura 2.6. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela (Cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental) durante el Mioceno-Plioceno. Las rocas-yacimiento más importantes de Venezuela occidental y oriental se depositan en esta época: En la Cuenca Oriental se puede observar la formación Oficina. (Tomado del léxico estratigráfico, 1980).

II.5.1.3 Litología

La Formación Oficina representa una alternancia de lutitas grises y marrones intercaladas e interestratificadas mayormente con areniscas y en menor proporción con limolitas de colores claros y granos finos a grueso. Componentes menores son capas delgadas de lignitos, areniscas siderítico-glaucóníticas y calizas delgadas con estructuras como en cono. El número de capas de lignitos varía desde 75 en el Área Mayor de Oficina hasta 120 en el Área Mayor de Anaco. Muchas de las areniscas pueden ser denominadas como asperones e incluso algunas como conglomeráticas.

Las areniscas se hacen más abundantes, de mayor espesor y de grano más grueso hacia la base de la Formación Oficina, siendo más copiosos en el Área Mayor de Temblador que en la de Oficina y de Anaco al Norte (Hedberg, 1947).

En cuanto a la litología de la Faja petrolífera del Orinoco se divide en tres unidades (Audemar, 1985):

- ❖ La Unidad I (Miembro Morichal del área de Cerro Negro; Formación Oficina Inferior en Zuata) caracterizada por areniscas masivas progradantes y la intercalación de lutitas y areniscas transgresivas.
- ❖ La Unidad II (Miembro Yabo del área de Cerro Negro; Formación Oficina Media en Zuata) representa una secuencia lutítica con intercalaciones ocasionales de areniscas y limolitas.
- ❖ La Unidad III (miembros Jobo y Pílon del área de Cerro Negro; Formación Oficina Superior de Zuata) es una secuencia predominantemente arenosa.

II.5.2.1 Formación Freites

La Formación Freites se extiende, en el subsuelo, a través de todo el flanco sur de la subcuenca de Maturín casi hasta el río Orinoco. Funkhouser *et al.* (1948) afirmaron que aflora en los domos de Santa Ana y San Joaquín del área de Anaco y en una faja amplia al oeste del campo Santa Ana y al norte hasta Aragua de Barcelona. La sección tipo es aquella penetrada por los pozos del campo Oficina, distrito Freites del estado Anzoátegui. Hedberg *et al.* (1947) mencionaron espesores de 335 m a 610 m desde el campo Yopales hacia los campos de Guara Oeste, Nipa y Leona Norte. Funkhouser *et al.* (1948) reportaron un espesor de 792 m en la carretera de Aragua de Barcelona. En el área Cerro Negro, la formación se reduce desde 550 m en el norte a 73 m en el sur (Jam y Santos, 1987).

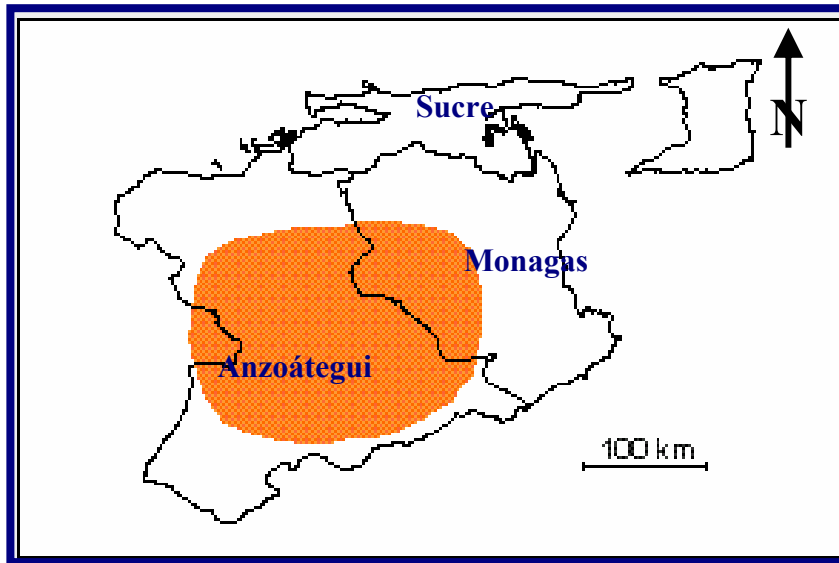


Figura 2.7. Ubicación Geográfica de la Formación Freites (tomado del léxico estratigráfico, 1980).

II.5.2.2 Edad

Sulek (1961.) ubica a Freites en el Mioceno Medio, llegando posiblemente al Mioceno Tardío. Audemard *et al.* (1985) ubican a la formación en el Mioceno Medio. Los macrofósiles reportados por Jam y Santos (1987) pertenecen también al tope del Mioceno Medio-base del Mioceno Tardío.

II.5.2.3 Paleoambientes

En la mayor parte de la cuenca, la Formación Freites representa en general un ambiente marino somero en su proporción inferior, pasando a ambientes de aguas algo más profundas en la parte media. La parte superior corresponde de nuevo a ambientes de aguas llanas. El ambiente sugerido por los ostrácodos es infralitoral, llegando a litoral. En el área Cerro Negro, la fauna es de ambiente transgresivo marino costero.

Audemard *et al.* (1985) identifican a la Formación Freites con su Unidad IV, la cual representa " el pico máximo de la segunda transgresión mayor del Mioceno". El carácter de la formación es nerítico. Hacia el margen sur de la cuenca, en el sector

Cerro Negro de la faja petrolífera del Orinoco, la Formación Freites disminuye de espesor al paso que se hace mucho más arenosa.

II.5.2.3 Litología

En la localidad tipo, Hedberg *et al.* (1947) describen lutitas fisiles verdes a gris verdoso, con areniscas en el tope y la base, que permiten la subdivisión de la unidad en tres intervalos: un intervalo superior de unos 100 m, con capas delgadas de areniscas arcillosas de grano fino, de color blanco verdoso, algo glauconíticas y muy persistentes lateralmente.

Un intervalo predominantemente lutítico y un intervalo inferior de aproximadamente 100 m de lutitas intercaladas con areniscas verde-amarillentas, de grano medio a grueso, glauconíticas, calcáreas o sideríticas y muy fosilíferas.

Las variaciones verticales en el contenido de arcilla, lutita, limo y siderita permiten una correlación extraordinaria sobre la mayor parte del flanco sur de la cuenca, por variaciones en la curva de resistividad amplificada de los perfiles eléctricos.

CAPÍTULO III

III.1 Geometría Fractal

La geometría euclidiana, la trigonometría y el cálculo son las herramientas que generalmente se usan para modelar los fenómenos naturales. Los modelos son descritos en términos de puntos, líneas rectas, círculos, parábolas y otras curvas simples. De esta forma los puntos de dimensión cero, las líneas y curvas unidimensionales, las figuras planas bidimensionales como el cuadrado y el círculo, y los cuerpos tridimensionales como los cubos y las esferas nos hacen ver al mundo como hasta ahora lo entendemos (Valdez, 1998).

Sin embargo, las ideas simples de recta y plano, o de otras figuras elementales de la geometría tradicional, no describen algunos de los fenómenos naturales estudiados en detalles, o los considera muy complejos. Es por esto que actualmente se considera una nueva geometría, llamada Geometría Fractal. En 1975 Benoit Mandelbrot establece las bases de esta nueva geometría, la cual está teniendo cada vez más aplicaciones en todas los campos del conocimiento.

III.1.1 Historia de los Fractales

Los fractales son los objetos matemáticos que constituyen la geometría de la teoría del caos. Los sistemas dinámicos y caóticos fueron descubiertos mucho antes que los fractales. Cabe destacar que antes del siglo XVII cuando se creó lo que hoy conocemos como “calculus”, se conocían funciones con irregularidades y discontinuidades, sin embargo, los matemáticos de la época supusieron que esas funciones discontinuas eran muy escasas, por lo que las consideraron excepciones de la matemática tradicional. (Nápoles, 2003).

Los primeros que empezaron a darse cuenta que en la naturaleza se daba muy seguido el fenómeno de irregularidades y que no eran excepciones como se suponía; fueron Cantor y Peano. (Nápoles, 2003).

Unas de las estructuras ya conocidas en esa época, que luego pasaron a formar parte de los fractales más reconocido son: la curva “copo de nieve” de Von Koch, el triángulo de Sierpinski y el Conjunto de Cantor.

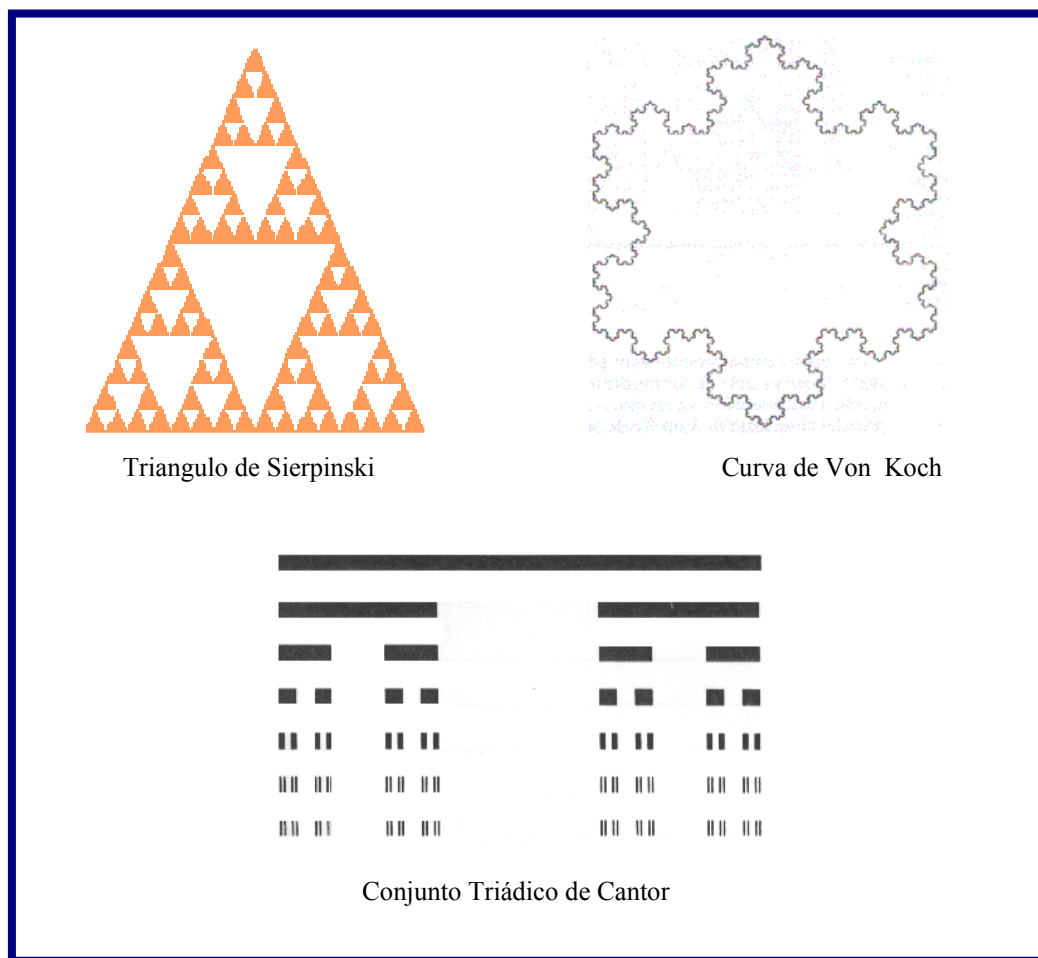


Figura 3.1. Algunos de los fractales más conocidos. Arriba a la derecha se presenta el Triangulo de Sierpinski el cual se puede construir a partir de cualquier triángulo. Arriba a la izquierda El copo de nieve de Koch representa una de las más sencillas figuras [fractales](#). Abajo hacia el centro El conjunto triádico de Cantor es un subconjunto de puntos del intervalo $[0,1]$.

III.1.2 Mandelbrot Benoit y los Fractales

Benoit Mandelbrot descubre, en 1958, un patrón en el comportamiento del ruido y las perturbaciones eléctricas, que por sus complejas características internas no podía ser descrito y estudiado con exactitud por la geometría tradicional. Este hecho llevo a Mandelbrot a publicar un libro en 1982 llamado “La Naturaleza de los Fractales” en el cual se plantea una interrogante ¿Cuanto mide realmente la costa de Inglaterra?.

La respuesta no es tan simple como pudiera parecer a simple vista. Para responder dicha pregunta se realizan 3 mediciones a la costa de Inglaterra con escalas distintas:

1. Se hace una primera medición desde un satélite. A esta escala se observan bordes suaves, armónicos con líneas casi rectas.
2. Otra medición, pero en esta oportunidad desde un avión, se observa mucho más detalle que en el caso anterior y aparecen ciertas rugosidades que antes no se percibieron.
3. Por último, se realiza la medición de la costa de Inglaterra con una regla de 30 cm, en esta oportunidad se toma en cuenta cada uno de los detalles de la costa, cada roca, cada rugosidad.

Tomando en cuenta que una longitud sin rugosidades es menos extensa que una totalmente irregular, se llega a la conclusión que los tres casos antes mencionados arrojarían resultados de las mediciones completamente distintos, en los cuales el de menor extensión sería el de la primera opción y el de mayor extensión la tercera opción.

Debido a lo antes expuesto se puede asegurar que las mediciones dependen de la escala que se utilice para hacer dicha medición. Estas escalas poseen un patrón y aunque estos patrones no son iguales a diferentes escalas, si lo son de manera estadísticamente, lo que representa una de las características principales de los fractales.

III.2 Fractales

La geometría fractal a despertado el interés en muchos ámbitos del saber mundial. El uso de los fractales se ha transformado en una herramienta multidisciplinaria utilizada no sólo por científicos si no también por artistas, psicólogos, sociólogos, economistas, ingenieros, etc. Es por esto que se hace difícil conseguir en la literatura un concepto unificado de lo que son los fractales. A continuación se presentan algunos de los conceptos más importantes:

- ❖ Fractales: es el conjunto de formas generadas normalmente por procesos matemáticos repetitivos y que se caracterizan por: 1) tener el mismo aspecto a cualquier escala de observación, 2) tener longitud infinita, 3) no ser diferenciables y 4) tener dimensión fraccional o fractal (Mandelbrot, 1975).
- ❖ Fractal: es un conjunto cuya dimensión de Hausdorff-Besicovitch es estrictamente mayor que su dimensión topológica (Mandelbrot, 1982).
- ❖ El término fractal, se refiere a la descripción de un objeto geométrico que mantiene una estructura similar frente a un grupo de escala y se aplica para el estudio de las formas irregulares que se observan en la naturaleza (Stewart, 1991).
- ❖ Un fractal es un objeto geométrico que si se amplía, muestra una serie repetitiva de detalles, de tal modo que a diferentes escalas a las que se examina, la estructura parece ser la misma. Un objeto fractal presenta el mismo aspecto cuando se observa a la escala de kilómetros, metros o milímetros (González, 1996).

En un esfuerzo por proponer un concepto unificado basado en las definiciones anteriores se tiene:

Un fractal es un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos matemáticos y computacionales, los cuales mantienen una estructura similar frente a un grupo de escala, es decir, tienen propiedades de autosimilitud y se aplica en el estudio de las formas irregulares.

Se pueden extraer algunas características fundamentales de un conjunto fractal (Quezada, 2000):

1. Un conjunto que es suficientemente irregular por no poder ser descrito con el lenguaje geométrico habitual, tanto localmente como globalmente;
2. Un conjunto que tiene una estructura fina, es decir, que tiene detalles en cualquier escala en que se le observa;
3. Un conjunto que presenta alguna forma de autosemejanza, que puede ser aproximada o estadística;
4. Usualmente, la dimensión fractal es más grande que su dimensión topológica, y no tiene por qué ser entera.



Figura .3.2. Ejemplos de Fractales en la Naturaleza. En la figura se observa una costa que representa fractales particularmente interesante. En la parte izquierda se aprecia un helecho el cual refleja la autosimilitud: una hoja que sale del tallo tiene la forma de un helecho completo, sólo su tamaño es menor.

III.3 Dimensión Fractal

Cuando se habla de geometría fractal, es pertinente incluir el concepto de Dimensión Fractal (D_f), en un sentido genérico esta dimensión nos provee el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico o de un objeto natural (Mandelbrot, 1987).

La importancia de la Dimensión Fractal, se debe a que en esta nueva geometría el concepto de longitud es muy complejo, ya que los fractales están compuestos por elementos cada vez más pequeños de si mismo, y es por esto, que en esta geometría se habla en términos de la dimensión y no de la longitud.

Es importante recordar que un cuerpo en el espacio se encuentra en una dimensión topológica específica. Estas dimensiones son:

- ❖ 0, si es un punto aislado o un número finito de puntos.
- ❖ 1, si es una recta o cualquier curva estándar.
- ❖ 2, si es un plano o cualquier otra superficie ordinaria.
- ❖ 3, si es un espacio o un objeto con volumen.

La dimensión fractal puede adquirir valores continuos en el espacio de los números reales, entre 0 y 3. En la figura 3.3. se hace una comparación simple entre la dimensión topológica y la dimensión fractal para ayudar a la comprensión de estos conceptos.

La figura 3.3 presenta en la parte superior cuatro (4) objetos considerados por la geometría tradicional en alguna de las tres dimensiones (dimensiones euclidianas " D_e "), o bien cero (el punto). En la parte inferior de dicha gráfica observamos los mismos tres objetos (exceptuando el punto), pero en esta oportunidad la línea tiene una dimensión fractal mayor que 0 pero menor que 1, esto se debe a que si amplificamos la representación de la línea a determinada escala de ampliificaciones podremos ver que existen espacios vacíos, (está lleno de poros), por lo que la dimensión depende de la cantidad de poros que tenga. Lo mismo ocurre con el plano y el cubo que tienen dimensiones: $1 < D_f < 2$ y $2 < D_f < 3$ respectivamente (González, 2001).

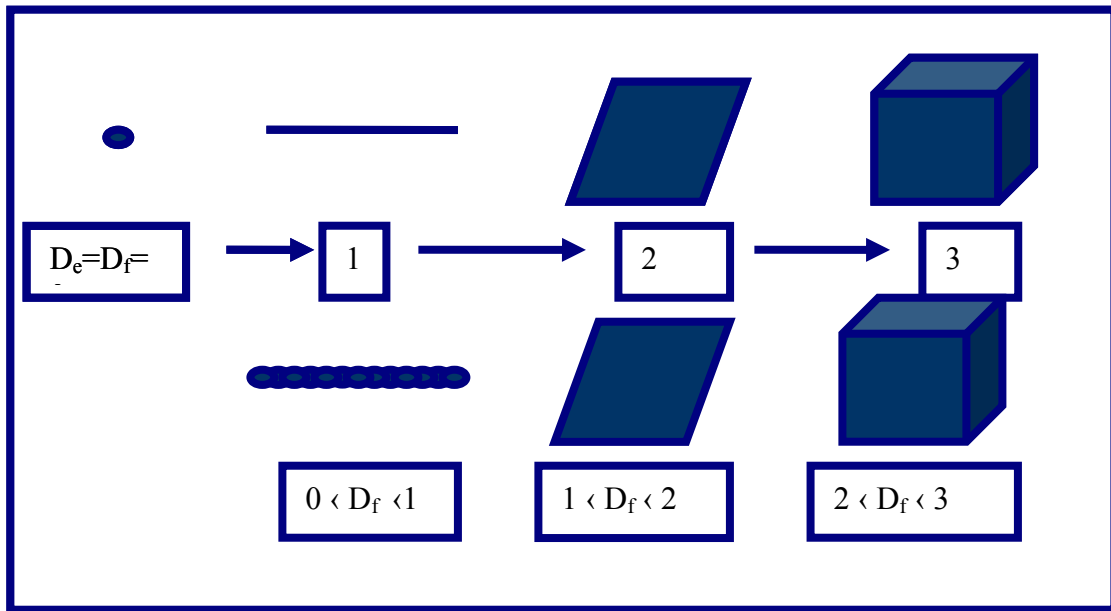


Figura 3.3 Esquema comparativo entre la dimensión euclidiana (D_e) y dimensión fractal (D_f). Tomado de González, 2001.

La dimensión fractal, D_f , es una generalización de la dimensión euclídea, D_e . Partiendo de un segmento de longitud 1, y segmentos de longitud L obtendremos $N(L)$ partes, de manera que

$$N(L) \cdot L^1 = 1 \quad (\text{III.1})$$

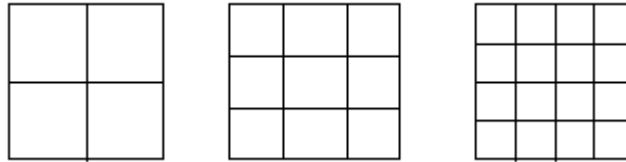
cualquiera que sea L :



Si el objeto inicial es un cuadrado de superficie 1, y se compara con unidades cuadradas cuyo lado es de longitud L , el número de unidades que es necesario para recubrirlo $N(L)$, cumple

$$N(L) \cdot L^2 = 1 \quad (\text{III.2})$$

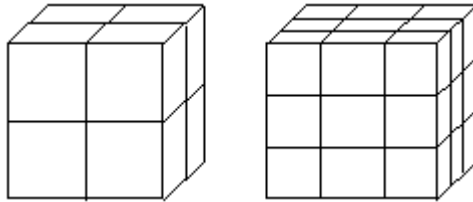
Cualquiera que sea L :



Si, por último, el objeto es tridimensional, como por ejemplo un cubo de volumen 1, y se mide en relación con unidades que sean cubos de arista L , entonces se cumple que

$$N(L) \cdot L^3 = 1 \quad (\text{III.3})$$

Cualquiera que sea L :



De todo lo anterior se puede generalizar que la dimensión fractal de un objeto geométrico es D si

$$N(L) \cdot L^D = 1 \quad (\text{III.4})$$

donde $N(L)$ es el número de objetos elementales, o de unidades de tamaño L que recubren, o que completan el objeto.

De donde despejando D se obtiene:

$$D = \log(N(L)) / \log(1/L) \quad (\text{III.5})$$

III.4 Tipo de Fractales

Una de las características fundamentales de los fractales es la autosimilitud: característica que presentan determinados objetos en los cuales los detalles más pequeños que lo componen tienen alguna relación estadística con sus propiedades globales, repitiéndose tales detalles de una manera infinita (Nápoles, 2003).

De esta definición se desprenden tres tipos de fractales:

- ❖ Fractales Lineales: son aquellos con un simple cambio en la variación de sus escalas. Los fractales lineales son exactamente idénticos en todas sus escalas hasta el infinito, es decir, son estrictamente autosimilares. Ejemplo de este tipo de fractales son: el Triángulo de Sierpinski, la curva de Von Koch y el conjunto de Cantor (Figura 3.1).
- ❖ Fractales no Lineales: se generan a partir de distorsiones por números complejos (con una parte real y una parte imaginaria), por lo que son muy aproximados en todos sus escalas a la figura original. La mayoría de los objetos fractales puramente matemáticos y naturales son de este tipo al no tener una autosemanjaza perfecta. Estadísticamente autosimilares o autoafines.

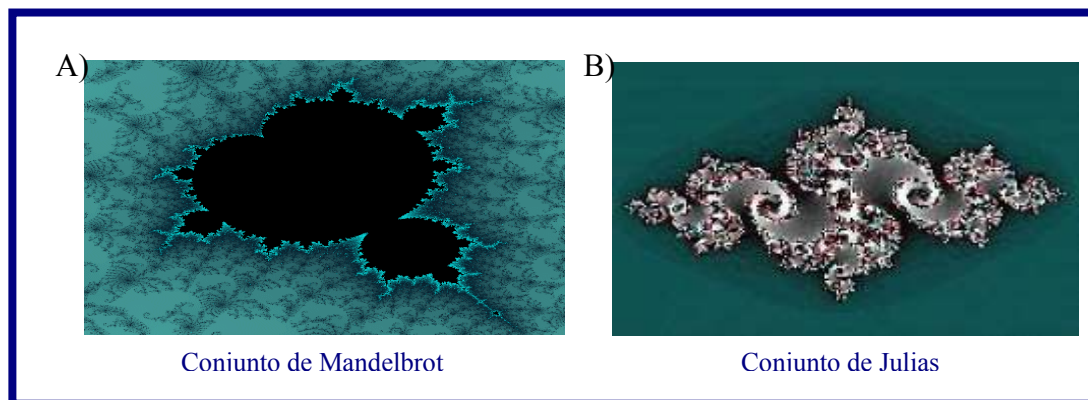


Figura 3.4. Fractales no Lineales. A) Conjunta de Mandelbrot es un conjunto de infinitos puntos en el plano complejo que satisfacen determinadas condiciones. B) Los Conjuntos de Julias son una familia de conjuntos fractales, que se obtienen al estudiar el comportamiento de los números complejos al ser iterados por una función analítica.

- ❖ **Fractales Plasmáticos:** con una forma muy indefinida, dependen mucho del azar por lo que pueden ser imágenes únicas e irrepetibles. No autosimilares. son:

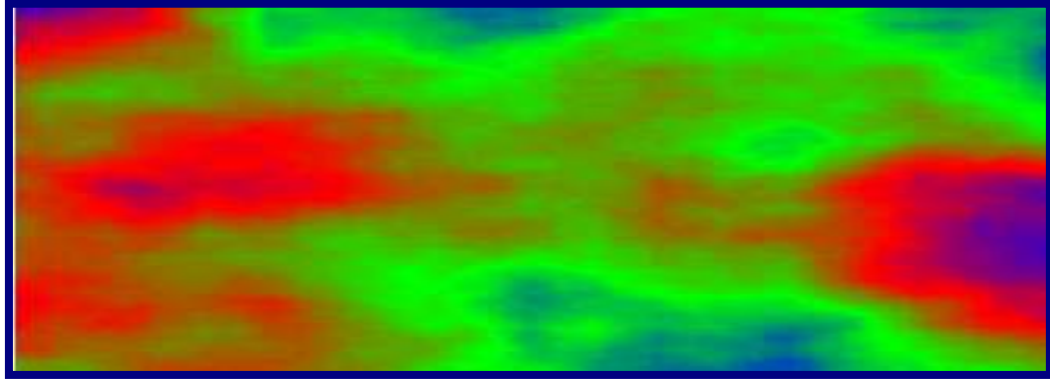


Figura .3.5. Fractales Plasmáticos: Estructuras como el plasma o las imágenes de difusión dependen en cierta medida del azar, por lo cual son únicas e irrepetibles. Ello se debe a que no es un proceso determinista, sino totalmente aleatorio. Consiste en un patrón único e irrepetible de colores.

III.5 Fractal Autoafin

Los fractales naturales no son autosimilares en sentido estricto, sólo lo son estadísticamente, a estos se los conoce como fractales autoafines.

Un fractal autoafin se define en términos de la varianza, del semivariograma y de la probabilidad.

En términos de la varianza, un fractal es autoafin si su varianza es la siguiente:

$$V \approx n^{2Ha} \quad (\text{III.6})$$

donde n es el número de elementos en la serie de tiempo y Ha es la medida de Hausdorff.

En términos del semivariograma, una serie de tiempo es un fractal autoafin si su semivariograma escala como (Sornette et al; 1991):

$$\gamma = S^{2Ha} \quad (\text{III.7})$$

En términos de la probabilidad, una serie de tiempo es un fractal autoafín cuando su semivariograma es el siguiente:

$$P_z \left\{ \left[\frac{y(t+\tau) - y(t)}{\tau^{Ha}} \right] < y_0 \right\} = 1 - F(y) \quad (\text{III.8})$$

donde $F(y)$ es la función de probabilidad acumulada.

III.6 Serie de Tiempo

En el contexto de los fractales autoafines, es apropiado introducir algunos de los conceptos fundamentales de las series de tiempo. Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones de una variable ordenados según transcurre el tiempo.

Los registros de pozos son un ejemplo de una serie de tiempo en un contexto Geológico. Los valores de densidad, de porosidad y de permeabilidad en los intervalos determinados por la profundidad, llevados a formato digital representan series de tiempo. Las series de tiempo tienen una gran gama de utilidad (Turcotte, 1997).

Las series de tiempo pueden ser caracterizadas por (Turcotte, 1997):

- ❖ Discontinuidades.
- ❖ Tendencias.
- ❖ Componentes Periódicas.
- ❖ Componentes Estocásticas.

Las componentes estocásticas incluyen las fluctuaciones que no están incluidas en las tendencias o en las componentes periódicas. Un aspecto importante

de las componentes estocástica es que pueden ser persistentes, antipersistentes o aleatorias.

- ❖ Persistente: los valores adyacentes en la series de tiempo se correlacionan positivamente.
- ❖ Antipersistencia: los valores adyacentes en la serie de tiempo se correlacionan negativamente.
- ❖ Aleatoria: los valores adyacentes en la serie de tiempo no se correlacionan.

La persistencia o antipersistencia de la componente estocástica puede cuantificarse usando la función r (Turcotte, 1997).

$$r_s = C_s / C_0 \quad (\text{III.9})$$

Donde C_s y C_0 se representan respectivamente:

$$C_s = \frac{1}{(T-s)} \int_0^{T-s} [y(t+s) - \bar{y}][y(t) - \bar{y}] dt \quad (\text{III.10})$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T [y(t) - \bar{y}]^2 dt = V \quad (\text{III.11})$$

s es el desfase; con $s=0$ tenemos $C_s=C_0=V$ (Varianza) y $r_s=1$. Mientras s aumenta r_s disminuye, ya que la correlación estadística de $[y(t+s)]$ con $y(t)$ disminuye.

En términos de fractales autoafines, uno de los aspectos más importantes de la serie de tiempo es la estacionariedad. Una serie de tiempo es estacionaria si las propiedades estadísticas de la serie de tiempo son independientes de su longitud T , en caso contrario la series de tiempo es no estacionaria.

Otro de los aspectos importantes es la semivarianza, que es la medida de correlación a lo largo del rango, es valido tanto para series estacionarias como para no estacionarias. Esta se define como (Turcotte, 1997):

$$\gamma_s = \frac{1}{2(T-s)} \int_0^{T-s} [y(t+s) - y(t)]^2 dt \quad (\text{III.12})$$

Se puede observar que ni la media \bar{y} , ni la varianza son usados en la definición anterior. Para una serie tiempo discontinuas tenemos (ob.cit):

$$y_k = \frac{1}{2(N-K)} \sum_{n=1}^{N-K} (y_{n+k} - y_n)^2 \quad (\text{III.13})$$

Para una serie de tiempo estocástica al azar los valores de y_k se acercarán a la varianza. El gráfico de y_s contra s ó y_k contra k se conoce como semivariograma (Gallart et al., 1994). Para una serie de tiempo estacionaria, la función r_s y la semivarianza γ se relacionan como sigue:

$$\gamma = V(1 - r) \quad (\text{III.14})$$

Una medida alternativa de correlaciones a largo rango es el análisis de rango re-escalado (R/S), que será estudiado en detalle mas adelante.

Un ejemplo de una serie no estacionaria es el movimiento Browniano. Una serie Browniana se obtiene sumando una secuencia del ruido blanco Gaussiano. Los valores de la serie de tiempo Browniana están dados por:

$$Y_{BW} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (\text{III.15})$$

La varianza del movimiento Browniano después que n valores han sido sumados, está dado por:

$$V_{BW} = \sigma_{\varepsilon}^2 n \quad (\text{III.16})$$

Donde σ_{ε} es la desviación estándar del ruido blanco. La desviación estándar del movimiento Browniano esta dado por:

$$\sigma_{BW} = \sigma_{\varepsilon} n^{1/2} \quad (\text{III.17})$$

III.6.1 Movimiento Browniano

Es el movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas nanoscópicas que se hallan en un medio fluido (por ejemplo polen en una gota de agua). Recibe su nombre en honor a [Robert Brown](#) quien lo describió en [1827](#). En [1785](#), el mismo fenómeno había sido descrito por Jan Ingenhousz sobre partículas de carbón en alcohol. El movimiento aleatorio de estas partículas se debe a que su superficie es bombardeada incesantemente por las [moléculas](#) del fluido sometidas a una agitación térmica. Este bombardeo a escala atómica no es siempre uniforme y sufre variaciones estadísticas importantes. Así la [presión](#) ejercida sobre los lados puede variar ligeramente con el tiempo provocando el movimiento observado.

Fue [Norbert Wiener](#) en 1923 quien dio la primera definición matemática rigurosa del movimiento. Él y [Paúl Lévy](#) elaboraron el modelo que supone: una partícula en cada instante se desplaza de manera independiente de su pasado; es como si la partícula «olvidara» de dónde viene y decidiese continuamente mediante un procedimiento al azar, hacia dónde ir, es decir, este movimiento a pesar de ser continuo, cambia en todo punto de dirección y de velocidad (ver Figura3.6). Tiene

trayectoria continua pero no tiene tangente en ningún punto. Las dos propiedades básicas que Wiener supuso son:

- Todas las trayectorias deben ser continuas.
- Una vez que fue observada la posición de la partícula en el instante $t=0$ (posición por tanto conocida), su posición (aleatoria) en un instante posterior t' debe estar regido por la [ley de Gauss](#), cuyos parámetros dependen del tiempo t transcurrido.

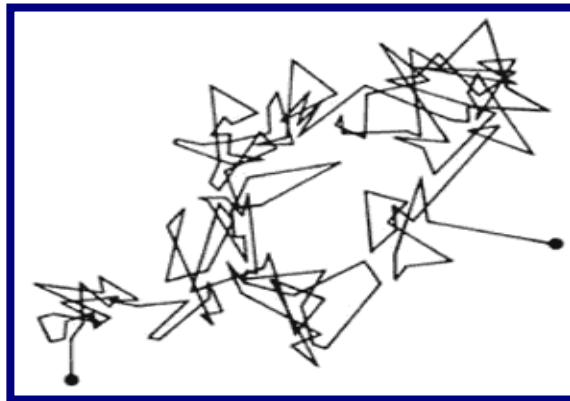


Figura 3.6. Trayectoria irregular que sigue una partícula browniana, este movimiento aleatorio se observa en algunas partículas nanoscópicas que se hallan en un medio fluido.

El movimiento browniano se define como el proceso aleatorio límite que se encuentra cuando n crece indefinidamente.

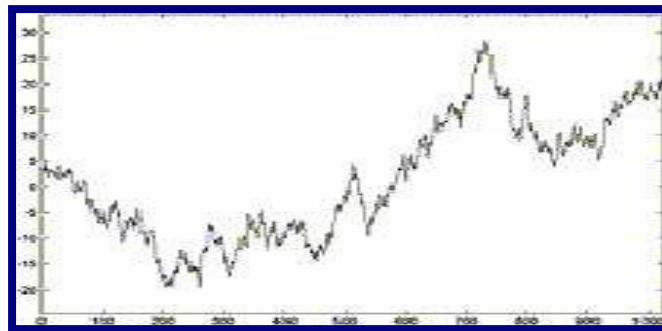


Figura .3.7 Simulación del movimiento Browniano. El movimiento Browniano tiene una trayectoria continua pero no tiene tangente en ningún punto.

En forma axiomática, una función aleatoria $B(t)$ es un movimiento browniano si :

- $B(0) = 0$ (con probabilidad 1)
- Los incrementos $\Delta B = B(t+h) - B(t)$ son gaussianos, con media nula y varianza h (proporcional al tiempo transcurrido)

Se observa que $B(t)$ resulta así $N(0,t)$ para cada valor de t y que los incrementos $B(t+h) - B(t)$ son estacionarios.

El segundo axioma se puede justificar sustituyendo

$$E(\Delta B^2) = h \quad (\text{III.18})$$

III.6.1.2 Movimiento Browniano Fraccional

El proceso Movimiento Browniano Fraccional (fBm) juega un papel muy importante en la construcción de modelos estocásticos, (modelos matemáticos para situaciones en las que interviene el azar y que evolucionan en el tiempo) que describan adecuadamente cierto tipo de fenómenos. El movimiento Browniano fraccional (fBm) es una generalización del movimiento Browniano, y fue originariamente introducido por Kolmogorov en 1940 en relación con la modelación de turbulencias, aunque su nombre proviene del influyente artículo de Mandelbrot y Van Ness (1968). El fBm es un proceso estocástico dependiente de un parámetro H (con $(0 < H < 1)$), llamado "índice de Hurst" que podemos expresar como:

$$E(\Delta B_H^2) = h^{2H} \quad (\text{III.19})$$

Lo anterior puede sustituirse por:

$$2^{2H} = 2(1 + \rho) \quad (\text{III.20})$$

siendo $-1/2 < r < 1$ el coeficiente de correlación

El movimiento browniano generalizado, o movimiento browniano fraccional, se designa con el acrónimo fBm . Puesto que es un proceso gaussiano, la estacionariedad de los momentos de orden 2 es suficiente para garantizar el carácter estacionario en sentido estricto.

La función de correlación del fBm tiene la siguiente expresión:

$$C_{B_H}(t, s) = E(B_H(t)B_H(s)) \quad (\text{III.21})$$

$$= \frac{\sigma^2 H}{2} (|s|^{2H} + |t|^{2H} - |t-s|^{2H}) \quad (\text{III.22})$$

Siendo:

$$\sigma_H^2 = \Gamma\left((1-2) + \frac{\cos(\pi H)}{\pi H}\right) \quad (\text{III.23})$$

El movimiento browniano fraccionario en función de H puede ser dividido en tres categorías (Figura 3.8):

- ❖ El caso de $H = 1/2$ va a ser el movimiento browniano normal, el cual va a tener incrementos independientes, no hay correlación de los incrementos del pasado y del futuro, el mismo está denominado de atracción Browniano (Restrepo, 2001).
- ❖ Para $1/2 < H < 1$, la correlación es positiva, este proceso no pertenece al dominio de atracción Browniano. En este caso si en algún tiempo pasado se tiene una tendencia de aumento entonces en el futuro se tendrá también un aumento, este proceso es persistente. Es la correlación positiva la que hace que el fBm pueda modelar fenómenos que tiendan a agruparse primero a un lado de la media y luego al otro. Este tipo de procesos además se denominan

procesos de memoria larga (PML), porque su función de autocovarianza no converge (Restrepo, 2001).

- ❖ Para $0 < H < 1/2$, se va a cumplir lo opuesto al caso anterior. Va a existir una correlación negativa entre los incrementos, por lo que las curvas parecen oscilar de forma más irregular. En este caso una tendencia a disminuir en el pasado implica una tendencia a aumentar en el futuro. Es la correlación negativa la que permite modelar fenómenos que fluctúen fuertemente alrededor de la media (Restrepo, 2001).

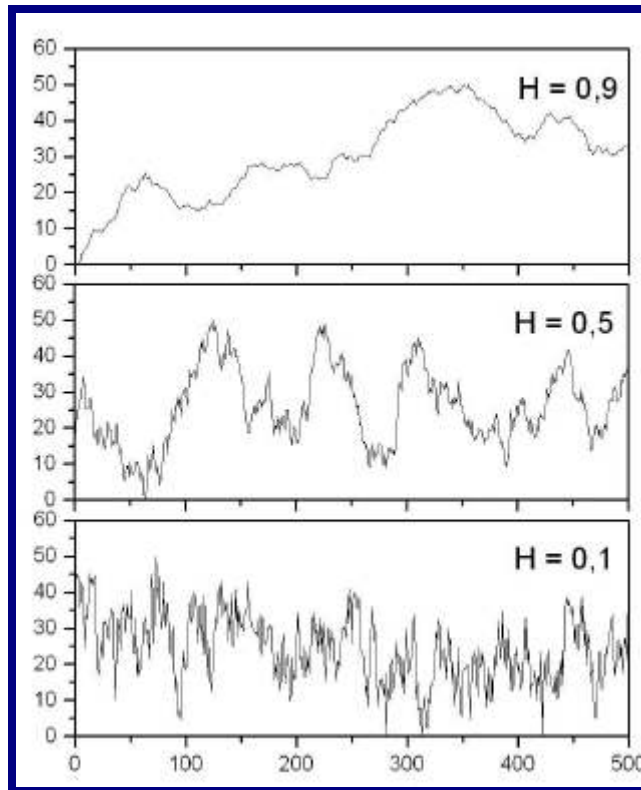


Figura 3.8. Registros de procesos correspondientes a distintos valores de exponente de Hurst (H).
 $H=0.9$: Proceso Persistente, $H=0.5$: Proceso Aleatorio, $H=0.1$: Proceso Antipersistente.

Las propiedades de escalamiento del movimiento fraccional browniano (fBm) puede definirse como:

$$\langle [\Delta B_H(\Delta t)]^2 \rangle = \langle [B_H(t) - B_H(t_0)]^2 \rangle \quad (\text{III.24})$$

$$\langle [\Delta B_H(r\Delta t)]^2 \rangle = \langle [B_H(rt) - B_H(rt_0)]^2 \rangle \quad (\text{III.25})$$

Donde r es un factor de escala y $t_0 = t - T$, y por lo tanto

$$\begin{aligned} \langle [\Delta B_H(r\Delta t)]^2 \rangle &= \alpha |rt - rt_0|^{2H} = r^{2H} \alpha |t - t_0|^{2H} \\ &= r^{2H} \langle [\Delta B_H(\Delta t)]^2 \rangle \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

La última ecuación describe el comportamiento de escalamiento estadístico del fBm. En el caso particular en el que $H=1/2$, se obtiene la relación del movimiento Browniano, el cual es un escalamiento autosemejante. Por otra parte el tipo de escalamiento que exhibe el fBm es autofin. La diferencia entre estos dos tipos de escalamientos es que al someter a un factor de aumento (o reducción) una porción del objeto, las formas serán idénticas si el escalamiento es autosemejante, mientras que para que las formas luzcan idénticas si el escalamientos es autoafin, deben utilizarse diferentes factores de aumento en las direcciones paralelas y perpendiculares al objeto.

III.6.1.3 Movimiento Fraccional Gaussiano

Estrictamente hablando el fBm no posee derivada, la irregularidad se mantiene a medida que $\Delta t \rightarrow 0$, y la derivada no está definida. Esto puede superarse si se considera una versión suavizada de la función, la cual se logra al integrar sobre un intervalo arbitrariamente pequeño δ (Restrepo, 2001). Cuando δ es pequeño comparado con la escala de observación, la función original y la suavizada son indistinguibles desde el punto de vista práctico. El suavizado remueve las variaciones de alta frecuencia del fBm y genera una función derivable que Mandelbrot y Van Ness (1968) denominaron ruido fraccional Gaussiano (rfG). El rfG es un proceso $\{\chi_t\}$ estacionario donde:

- $\mu = E \{\chi_t\}$
- $S_t = cov \{ \chi_t, \chi_{t+\tau} \} S_t$ para $\tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, con μ y S_t números finitos independientes de t .

La función de covarianza para el rfG es

$$s_t = \frac{\sigma^2}{2} \left(|t+1|^{2H} - 2|t|^{2H} + |t-1|^{2H} \right) \quad (III.27)$$

A continuación se presenta una tabla con la clasificación del movimiento fraccional gaussiano según el valor de H .

Tabla 3.1. Clasificación del rfG según el valor de H

$0 < H < 1/2$	Estacionario, no posee memoria larga
$H = 1/2$	Estacionaria, ruido blanco
$1/2 < H < 1$	Estacionario, posee memoria larga

III.7 Fractales de los Registros de Pozos

A lo largo de la historia de la geometría fractal se han realizado diversos estudios, en los cuales los conjuntos fractales se aplican en el área de la geología del petróleo para modelar señales geofísicas, fenómenos difusivos, etc. (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988; Borton et al., 1995; Hastings et al., 1993). Dichos estudios han arrojado que las heterogeneidades de los yacimientos pueden modelarse utilizando conjuntos fractales como el Movimiento Fraccional Browniano (mfB) y el ruido Fraccional Gaussiano (Restrepo, 2001).

Algunos de los estudios realizados son:

- ❖ Mandelbrot y Wallis (1965): modelaron registros geofísicos con ruidos fraccionales.
- ❖ Hewett (1986): las variaciones verticales de los registros de porosidad tomados en pozos de petróleo muestran consistencia con el modelo rfG.
- ❖ Crane y Tumban (1990): la variación de la porosidad en la dirección horizontal puede ser modelada con un rfG.
- ❖ Neuman (1990): un modelo mfB para la distribución de permeabilidad se ajusta bien con los datos de dispersividad efectiva en función de la distancia.
- ❖ Montes (1993): un registro eléctrico como serie de datos geofísicos presentan un comportamiento fractal, el cual puede relacionarse con el proceso que lo generó.
- ❖ Painter y Paterson (1996): los registros acústicos verticales pueden ser representados con un modelo de Movimiento Fraccional Levy (mfL).

Los estudios que caracterizan registros como conjuntos fractales presentan una gran diversidad de resultados, no sólo respecto a la clasificación de la señal como Ruido Fraccional Gaussiano o como un Movimiento Fraccional Browniano, sino también respecto al valor estimado del exponente de Hurst.

Uno de los métodos usados para calcular el exponente de Hurst es el Análisis de Rango Re-escalado, creado por Hurst. Restrepo en 2001 recomienda para hacer un análisis confiable usar un número de datos mayor de 1024.

III.8 Análisis de Rango Reescalado

El análisis de rango reescalado o análisis R/S es un método estadístico usado para evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes. Es una herramienta estadística ideal para analizar procesos físicos y geofísicos. El resultado que proporciona el análisis R/S es el exponente de Hurst, que como ya se vió es una medida de tendencia o persistencia de una serie tiempo.

El primero en estudiar las series fractales fue el científico británico Harold Edwin Hurst (1880-1978). Hurst estudio la hidrología del río Nilo, en particular los registros de inundación y sequías. Él consideró el flujo de un río como una serie de tiempo y determinó los límites de almacenamiento en un depósito idealizado. Con base en estos estudios él introdujo el concepto de **Análisis de Rango Reescalado**.

Para una mayor comprensión del método a continuación se presenta un ejemplo del trabajo que realizó Hurst en 1950:

Se considera un depósito detrás de un dique, el flujo en el depósito es el flujo del río $Q(t)$. El flujo fuera del depósito $\bar{Q}(T)$ se asume que es la medida del flujo en el depósito para un periodo T .

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (\text{III.28})$$

El volumen de agua en el depósito en función del tiempo $V(t)$ es:

$$V(t) = V(0) + \int Q(t') dt' - t\bar{Q} \quad (\text{III.29})$$

Donde $V(0)$ es el volumen de agua en un tiempo 0. Si $t=T$ y sustituyendo en III.28 en III.29, tenemos que: $V(T)=V(0)$.

El rango $R(T)$ se define como la diferencia entre el volumen máximo de agua V_{max} y el volumen mínimo de agua V_{min} durante un periodo T .

$$R(T) = V_{max}(T) - V_{min}(T) \quad (III.30)$$

El análisis de rango reescalado es definido por R/S donde S es la desviación estándar del flujo $Q(T)$ durante un periodo T .

$$S = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \{Q(t') - \bar{Q}\}^2 dt' \right]^{1/2} \quad (III.31)$$

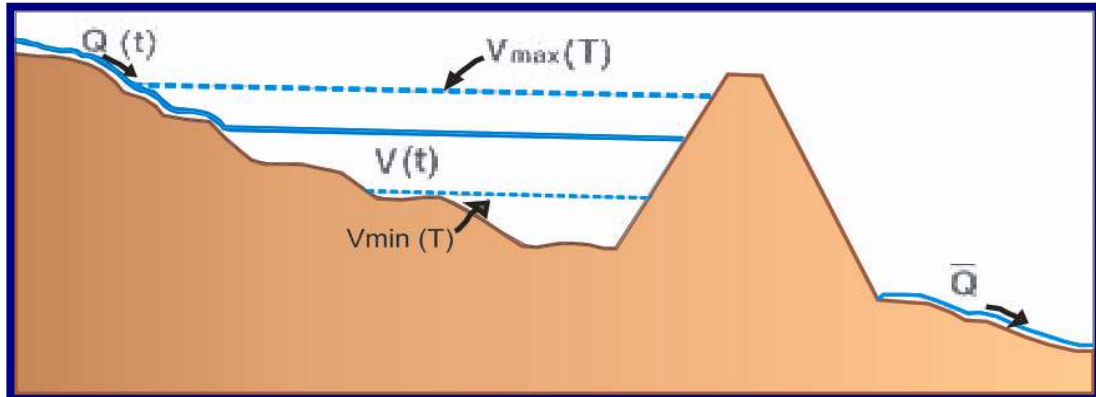


Figura 3.9. El gráfico ilustra el Análisis de Rango Re-Escalado (R/S). Se considera un depósito detrás de un dique, el flujo en el depósito es el flujo del río $Q(t)$. El flujo fuera del depósito $\bar{Q}(T)$ se asume que es la medida del flujo en el depósito para un periodo T . $V(t)$ representa el volumen de agua en un tiempo t .

III.8.1 Análisis de Rango Reescalado Aplicado a Series de Tiempo:

En el análisis de rango reescalado (R/S), R es el rango de los valores (máximos-mínimos) para una distancia dada de valores dentro de una base de datos. R/S es calculado dividiendo éste rango entre la desviación estándar S . Esto se puede plantear de la siguiente manera:

Se tiene una serie de tiempo discreta con valores Y_i , tal que su promedio, al considerar N valores de la serie, se designa como Y_N . Se considera la siguiente suma:

$$Y_N = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_N) \quad (\text{III.35})$$

De estos nuevos valores se toma la diferencia entre el máximo y el mínimo y se define el rango:

$$R_N = (y_N)_{\max} - (y_N)_{\min} \quad (\text{III.36})$$

Luego se calcula la varianza $S_N = \sigma N$; y se calcula H_u de:

$$\left(\frac{R_N}{S_N} \right) = \left(\frac{N}{2} \right)^{H_u} \quad (\text{III.37})$$

Para obtener el coeficiente H , a partir de una serie de tiempo de longitud N , se divide la serie en un conjunto de subseries de longitud s . Para cada subserie de longitud s , $R(s)$ y $S(s)$ son determinados. Se calcula el promedio $\langle R(s)/S(s) \rangle$ para cada valor de s . Cuando se tienen todos los datos, se traza una línea recta (o una regresión lineal) sobre la distribución de los puntos en escala logarítmica del cálculo de R/S [$\log (R/S)$] contra los puntos provenientes de los datos de s en escala logarítmica [$\log(s)$]. Así, la pendiente de la recta trazada sobre los puntos de los datos en la escala logarítmica genera el valor del exponente de Hurst.

Dos factores intervienen en la determinación del exponente de Hurst: la manera en que la serie de tiempo es dividida en un conjunto de subseries y el rango de los valores de s sobre el cual la pendiente de $\log\langle R(s)/S(s)\rangle$ contra $\log(s)$ es determinada.

Debido a la importancia que tiene la división de la serie de tiempo en la determinación del exponente de Hurst, a continuación se presenta un ejemplo para su mayor comprensión (Turcotte, 1997):

Se tiene una serie de tiempo, cuya longitud de datos es 64,

$$Y_i = (i=1,2,3,\dots,64)$$

En primer lugar dividimos los datos en dos partes

$$(i=1,2,3,\dots,32 \text{ y } i=33,34,35,\dots,64)$$

Se obtienen valores para R_{32} y S_{32} para las dos partes, se promedian los dos valores de R_{32}/S_{32} para obtener $\langle R_{32}/S_{32}\rangle$.

Los datos se dividen ahora en cuatro partes

$$(i=1,2,3,\dots,16 ; i=17,18,\dots,32; i=33,34,\dots,48 \text{ y } i=49,50,\dots, 64)$$

Se obtienen los valores de R_{16}/S_{16} para las cuatro partes y se promedian para dar $\langle R_{16}/S_{16}\rangle$. Este proceso se continua para $N=8$ y $N=4$ para obtener $\langle R_8/S_8\rangle$ y $\langle R_4/S_4\rangle$ respectivamente.

III.9 Naturaleza Fractal de los Sedimentos

Las propiedades de los fractales ofrecen herramientas a la estratigrafía secuencial para estimar e interpretar los cambios en la tasa de sedimentación de una escala de tiempo a otra (Schlager).

La sedimentación está regida fundamentalmente por tres factores: aportes, subsidencia de la cuenca y el cambio del nivel del mar en el tiempo geológico. Schlager en el artículo “Fractals nature of stratigraphic secuencias” plantea que las fluctuaciones del nivel del mar y la tasa de sedimentación, factores básicos en la secuencia estratigráfica poseen una naturaleza fractal en el dominio del tiempo. Schlager propone que los patrones de secuencias y los “systems tracts” no varían dependiendo de la escala de tiempo en la cual se les estudie, lo que indica que son fractales estadísticos o fractales autoafines.

Sadler en 1999 vincula el Movimiento Fraccional Browniano con los modelos de acumulación de sedimentos, y señala que en algunas escalas de tiempos las características depositacionales son de canales, deltas, plataformas. Estas características depositacionales tienden a ser estacionarias y a favorecer la persistencia de acumulación en el mismo lugar evidenciando un proceso de características persistente, mientras que las escalas de tiempo más largas, el mismo aumento de sedimentos favorece el cambio de ambientes depositacionales, dando lugar a una persistencia negativa.

Arizabalo et al. (2006) al igual que los autores ya mencionados anteriormente señala que los cambios del nivel del mar dan como resultados variaciones aleatorias en las propiedades petrofísicas de los sedimentos, esto se puede apreciar en los registros de pozos, los mismos son considerados como fractales autoafines.

El exponente de Hurst puede ser usado para inferir si el proceso de sedimentación ha sido persistente ($1/2 < H < 1$) o antipersistente ($0 < H < 1/2$). En este trabajo se plantea establecer correlación entre H y la estratigrafía por secuencias, para ellos es pertinente recordar algunos términos:

- Cortejos o “Systems Tracts”: son los constituyentes de una secuencia, y consisten de todo un depósito de facies asociados a un segmento de la curva eustática.
- Cortejo de Nivel Bajo o “Lowstand (LST)”: se forma por un descenso brusco del nivel del mar ocasionando la exposición subaérea de la antigua plataforma y de las partes altas del talud.
- Transgresivo (TST): subida rápida del nivel del mar que produce una transgresión en áreas costeras y el depósito de sedimentos hemipelágicos sobre sedimentos de la plataforma.
- Cortejo de Alto Nivel o “Highstand (HST)”: es el conjunto de materiales depositados cuando el nivel relativo del mar está alto, se caracteriza por depósitos progradantes.
- Superficie Transgresiva o “Flooding surface (FS)”: superficie transgresiva que separa al LST del TST y la misma quedará marcada como una interrupción brusca de una sucesión regresiva.
- Superficie de Máxima Inundación o “Maximum Flooding Surface (MFS)”: separa al TST del HST y en relación a la cual se depositan las secciones condensadas.
- Sección Condensada: son las facies depositadas en los momentos de máxima extensión del mar en un ciclo eustático.

En la figura 3.10 se observan los diferentes cortejos descritos:

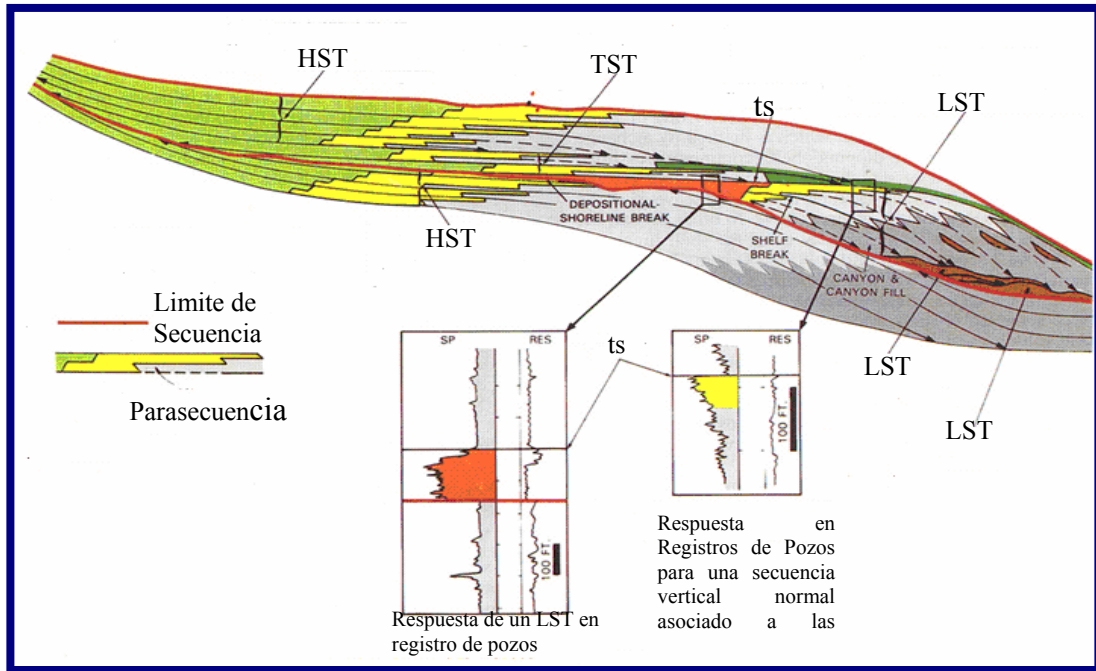


Figura 3.10 Diferentes tipos de sistemas de cortejos o "systems tracts". Arriba a la izquierda se observa un sistema de cortejo de alto nivel HST asociado a una parasecuencia con interrelación entre los procesos de agradación y retrogradación, mas abajo se observa otro HST en una secuencia más vieja. Se observa la superficie de transgresion, también señalada en los registros de pozos mostrados en la figura. Al centro de la imagen se encuentra un sistema transgresivo TST asociado a un proceso de retrogradación. A la izquierda del objeto se observan sistemas de cortejos de bajo nivel.

CAPÍTULO IV

IV.1 Registros de Pozos

Los registros de pozos son de gran importancia en la industria de hidrocarburos, ya que son técnicas geofísicas “in situ”, que se utilizan en las operaciones petroleras para obtener una mayor información de los parámetros físicos y geológicos del pozo, tales como: cantidad de petróleo móvil, saturación de agua de la formación, resistividad de las rocas, porosidad de las mismas, etc.

Haciendo una clasificación físicas de estas técnicas, tenemos que son de naturaleza: eléctricas, nucleares, acústicas y electromagnéticas, cada una de las cuales dá una información específica en función de sus propiedades físicas. El análisis en conjunto de varias de ellas, sumada con la información que se tenga del campo petrolero (sísmica, información de pozos cercanos y otros), permite obtener un perfil de la formación adyacente al pozo petrolero, así como, estimar la cantidad de petróleo extraíble, y por lo tanto determinar si dicho pozo es de valor comercial.

El proceso de perfilaje comienza con las revisiones y calibraciones en superficie, para luego introducir el arreglo de herramientas hasta el fondo del pozo. En general la velocidad de perfilaje es mantenida constante entre 1800 y 5400 pies/hora. El arreglo tiene, típicamente, un diámetro de 5 5/8 pulgadas y una longitud de 20' a 50' y consiste usualmente de varias herramientas conectadas en serie. El esquema de un pozo con los parámetros físicos obtenibles de los registros se presenta en la Figura 4.1.

Los registros de pozo son grabados en pistas (“tracks”), las cuales pueden ser lineales, logarítmicas o híbridas, que no son más que una mezcla de las dos anteriores. Los mismos constan de un “header” o encabezado, donde residen los datos de la perforación como la fecha, el nombre de la compañía, país, nombre del campo, tipo de lodo usado en la perforación, temperatura en superficie, coordenadas UTM, latitud, longitud, etc.; y los datos de los registros en si.

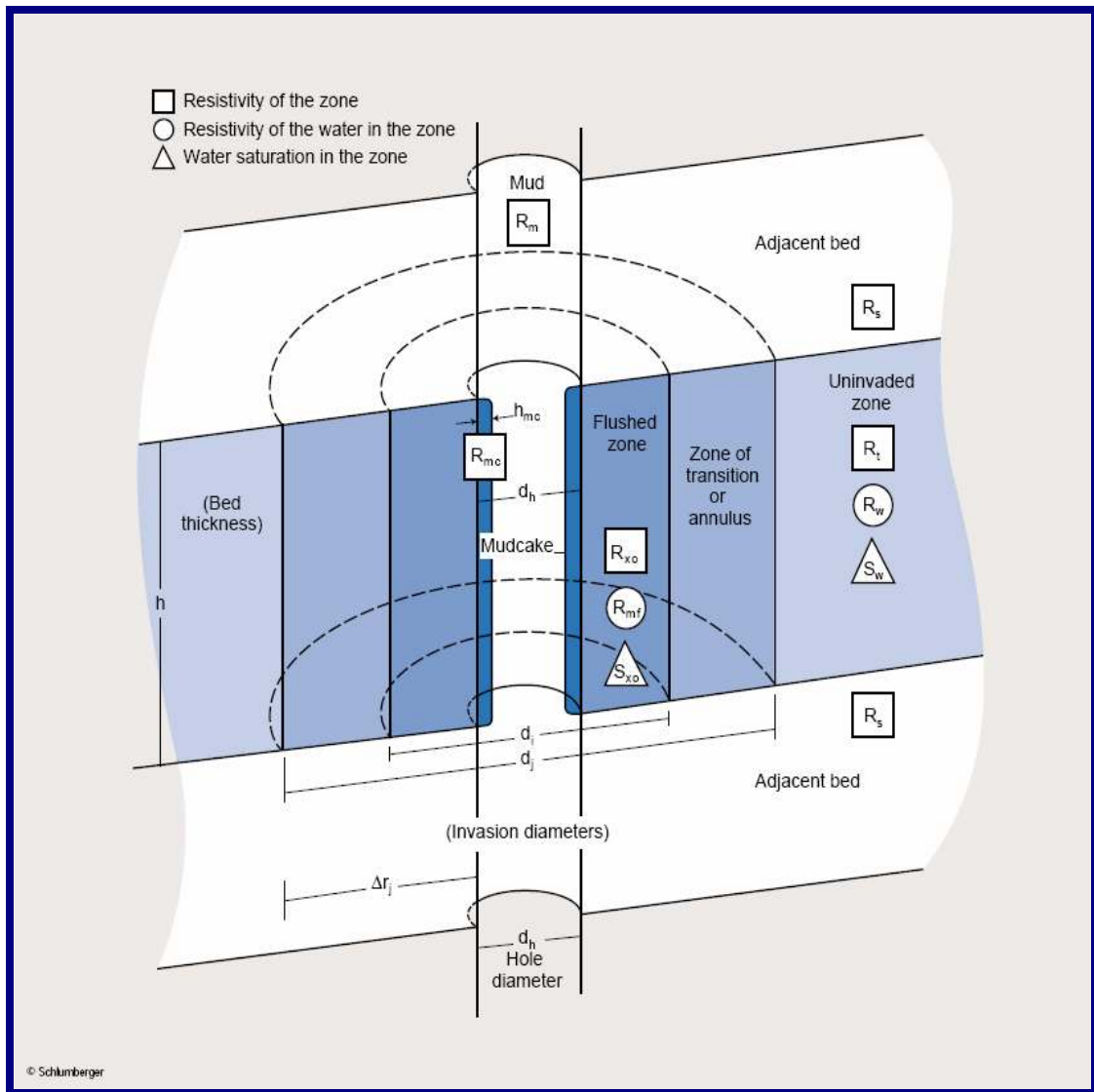
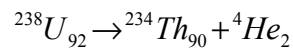


Figura 4.1. Esquema de un pozo de petróleo indicando los parámetros físicos obtenibles de los registros. Se observa la zona invadida por el lodo de perforación y la zona no invadida. Tomado de WEC 1997.

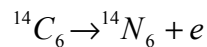
IV.1.1 Registros de Rayos Gamma

El registro de rayos gamma o GR mide la radiactividad natural de las formaciones en el subsuelo, es decir, la medida de la radiación que se emite espontáneamente. La emisión de partículas radioactivas se basa en el decaimiento radiactivo. Existen tres tipos básicos de radiación que un átomo emite al desintegrarse y se conocen comúnmente como:

- Emisión de una partícula alfa (${}^4\text{He}_2$).



- Emisión de una partícula beta ($\pm e$)



- Emisión de una partícula gamma.

Los rayos gamma pueden ser absorbidos según tres tipos de mecanismos, que dependen de la energía del rayo gamma y del número atómico del material absorbente:

- Efecto fotoeléctrico ($e < 100 \text{ Kev}$)
- Efecto Compton ($100 \text{ Kev} < e < 2 \text{ Mev}$)
- Producción de pares ($2 \text{ Mev} < e$)

Efecto fotoeléctrico ($e < 100 \text{ Kev}$)

Consiste en la expulsión de un electrón de un átomo por un rayo gamma, acelerando este electrón a un nivel de energía, igual a la energía del rayo gamma menos la energía que liga al electrón con su medio ambiente.

Producción de pares ($e < 2 \text{ Mev}$)

Cuando un fotón, en virtud de su alta energía, penetra el material a mayor profundidad; al ocurrir la colisión se producen un par de partículas que son un positrón y un electrón de altas energía.

Efecto Compton ($100 \text{ Kev} < e < 2 \text{ Mev}$)

Consiste en la absorción de la energía del rayo gamma con la consecuente producción de un electrón y un rayo gamma adicional de menor energía. Este nuevo rayo a su vez puede ser absorbido por cualquiera de los dos mecanismos.

La unidad de energía de los rayos gamma que generalmente se usa es el electrón-volt (eV), que se define como la energía impartida a un electrón cuando es propulsado por una diferencia de potencial de un volt. Usualmente, la energía de los rayos gamma está dentro del rango de 10^5 a 10^6 eV, de manera que la unidad práctica de medida es de millón de electrón-volts (MeV).

Todas las rocas y entre ellas las sedimentarias, contienen elementos radioactivos en cantidades variables. Las cantidades pueden ser de algunas partes por millón, hasta algunas partes por cien. Típicamente, las arenas limpias contienen baja cantidad de estos elementos, mientras que las arcillas o lutitas, una cantidad considerablemente mayor.

Los registros de rayos gamma antiguamente fueron usados exclusivamente en forma cualitativa para fines de correlación litológica. Posteriormente, su uso se ha venido extendiendo a la interpretación cuantitativa, tanto en la evaluación de formaciones petroleras como en la detección de depósitos de valor, lo cual ha hecho necesario calibrar cuantitativamente los valores que se obtienen con estos registros.

Anteriormente los registros estaban calibrados en micro gramos de radio-equivalente por tonelada métrica de formación mg Ra-eq/ton. Posteriormente se adoptó definitivamente la unidad API de radiación. Esta unidad se define como 1/200

de la deflexión que se produce en un registro, al colocar una sonda entre dos formaciones de valor de radioactividad conocida de un pozo artificial de la Universidad de Houston.

La curva de rayos gamma tiene prácticamente el mismo uso interpretativo que la curva del potencial espontáneo. En el aspecto cualitativo se le puede usar para correlación litológica y estratigráfica. En la interpretación cuantitativa su uso principal es en la estimación del contenido de arcilla en la formación.

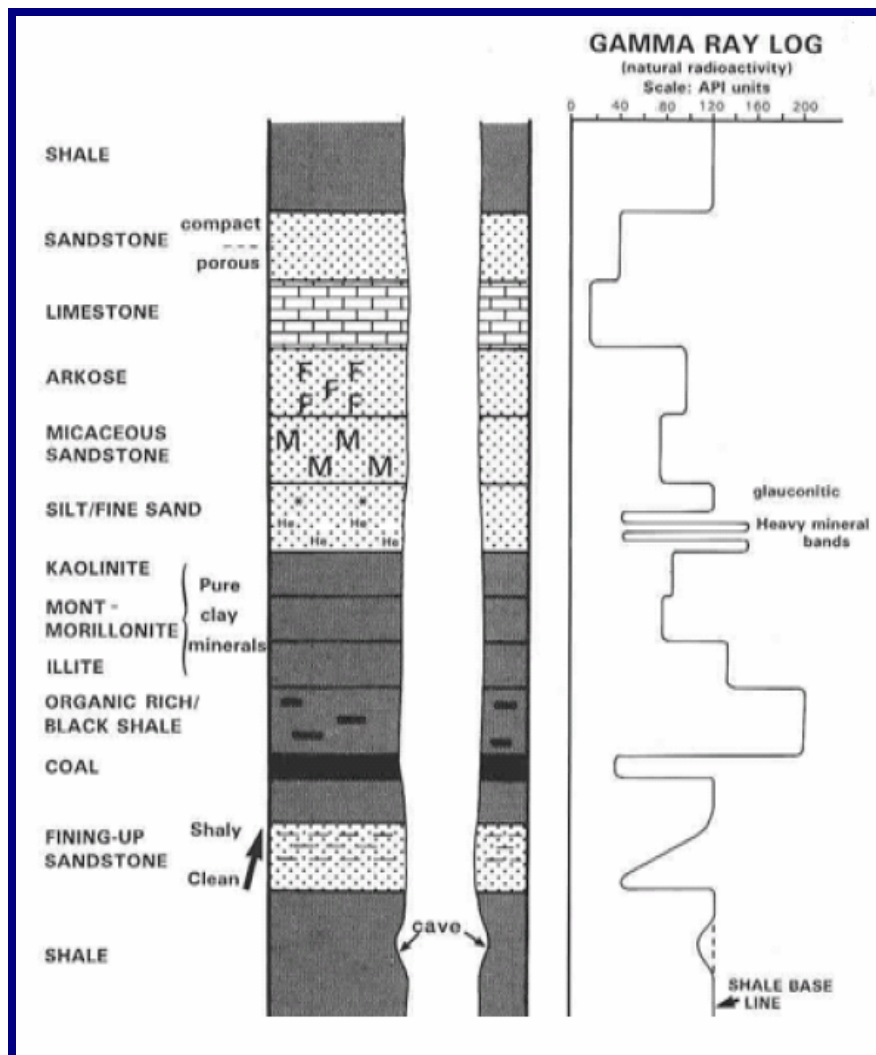


Figura 4.2. Correlación del registro petrofísico de pozo Rayos Gamma. Típicamente, las arenas limpias contienen baja cantidad de elementos radioactivos, mientras que las arcillas o lutitas, una cantidad considerablemente mayor.

IV.1.2 Registro de Potencial Espontáneo

Es una medida espontánea de la diferencia de potencial natural que existe entre un electrodo en el pozo y un electrodo de referencia en la superficie. Este potencial es creado por la formación con ayuda del lodo de perforación y no se necesita aplicar ningún voltaje externo.

Los usos principales de ésta herramienta son (CIED, 2001):

- ❖ Seleccionar zonas permeables.
- ❖ Calcular la resistividad del agua de formación.
- ❖ Cálculo de volumen de arcilla.

Como principios de medición tenemos tres factores necesarios para provocar una corriente de potencial espontáneo (SP):

- ❖ Fluido conductor dentro del pozo.
- ❖ Capa porosa y permeable rodeada por una formación impermeable.
- ❖ Una diferencia de salinidad entre el fluido del pozo y el fluido de formación, ejemplo: el lodo filtrante y el agua de formación.

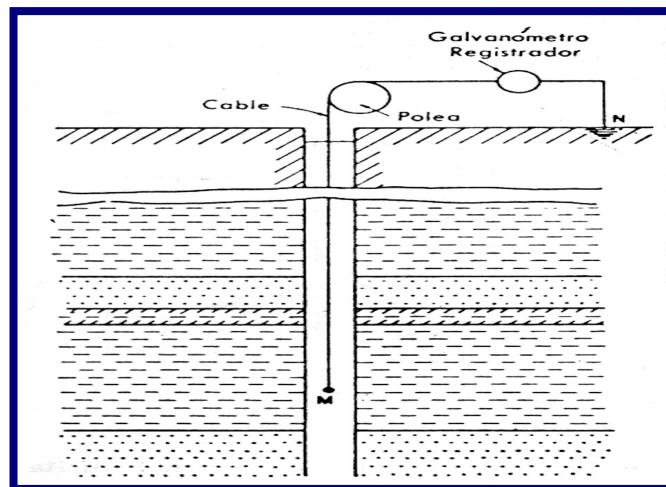


Figura 4.3. La figura muestra como se obtiene los valores de Sp. La medida del SP se obtiene mediante un electrodo, que va en la misma sonda con que se obtienen simultáneamente otros registros, y un electrodo colocado en la superficie en un medio húmedo que bien puede ser la presa del lodo de perforación o un agujero en las vecindades del camión de registros.

IV.1.3 Registro de Resistividad

La resistividad eléctrica es una medida inducida, la cual se basa en la intensidad de corriente eléctrica, las rocas pueden considerarse aisladores, por lo que su resistividad (ρ_x) es alta comparada con la resistividad del agua salada (ρ_w).

Los registros de resistividad han consistido de tres curvas: de investigación profunda, media y somera; esto debido a que no se ha diseñado una herramienta que pueda leer lo suficientemente profundo para garantizar una lectura de resistividad de la zona virgen. Con las tres curvas mencionadas anteriormente y la presunción de un perfil de invasión de escalón, puede hacerse correcciones para estimar el valor de Rt a partir de la lectura profunda (CIED, 2001).

Las curvas están categorizadas por su profundidad de investigación: profunda ($> 3'$), media (1.5'-3'), somera (0.5'-1.5's) y para la zona lavada (1'-6'). Todas las curvas, profundas, medias y someras son obtenidas de electrodos o bobinas montadas en tubería cilíndrica, las cuales son corridas más o menos centralizadas en el hoyo. Los electrodos están montados en un patín y son forzados contra una parte del hoyo.

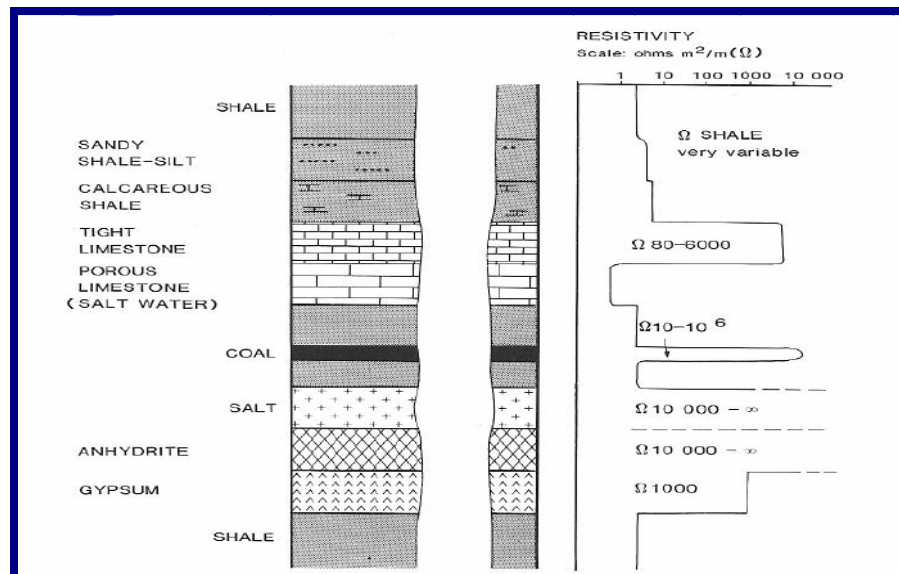


Figura 4.4. Registros de Resistividad: en la figura se puede observar, la respuesta de la medición de la propiedad petrofísica para cada litología. El registro de resistividad mide la resistencia al flujo de corriente eléctrica.

IV.1.4 Registro de Inducción

El registro de inducción mide, la conductividad de una formación en el subsuelo, la cual es la inversa de su resistividad.

En una herramienta de inducción, una corriente constante de 20 kHz de frecuencia, alimenta una bobina transmisora. Esto genera un campo magnético alterno que produce una corriente circular, que transita en el medio. Esta corriente generada produce, a su vez, un campo magnético que induce un voltaje en la bobina receptora. Este voltaje es aproximadamente proporcional a la conductividad del medio que rodea a la herramienta (CIED. 2001).

Los registros de inducción no requieren un fluido conductor en el hoyo para operar. Trabajan muy bien en hoyos llenos de aire o gas, o con lodo en base de aceites (Op.cit.).

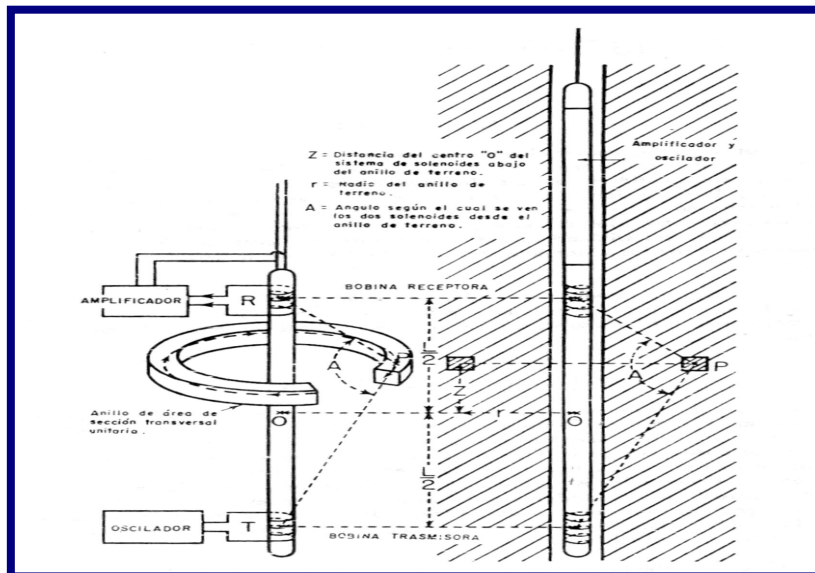


Figura 4.5. En la figura se muestran los principios básicos de la medición. La sonda de inducción está constituida esencialmente por una bobina emisora alimentada por una corriente oscilatoria de 20.000 ciclos/seg y amplitud constante y por una bobina receptora colocada a una determinada distancia de la emisora.

IV.1.5 Registros de Densidad

Ésta técnica es utilizada principalmente para determinar la porosidad de la formación. La medición de la densidad de la formación, también se aplica en la identificación de minerales, detección de gas, evaluación de arenas arcillosas y litologías complejas en la determinación de arcillas petrolíferas.

Una fuente radioactividad, que para este caso será una muestra que emita radiación gamma, colocada en un patín es aplicada contra la pared del pozo. Esta fuente emite hacia la formación rayos gamma (CIED, 2001). Los tres fenómenos que caracterizan las interacciones de los rayos gamma con la materia son: producción de pares, difusión de Compton y absorción fotoeléctrica.

- ❖ Producción de pares: un fotón de alta energía es absorbido por un núcleo atómico, y su energía intrínseca es transformado en un par electrón-positrón, los cuales se alejarán entre si (CIED, 2001).
- ❖ Efecto Compton, un rayo gamma “colisiona” con un electrón libre o ligado a un átomo, el cual cede una parte de su energía a éste y emite otro rayo gamma con energía menor. Estos últimos rayos son detectados y evaluados como una medida de la densidad de la formación, ya que el número de rayos gamma Compton está directamente relacionado con el número de electrones en la formación (CIED, 2001).
- ❖ Efecto Fotoeléctrico: si los fotones de baja energía, (<0.2 MeV), su energía es completamente absorbida cuando impactan en un electrón, siendo este último expulsado del átomo. El exceso de energía es transferida al electrón en su forma cinética (ob.cit).

A continuación se describen algunas de las herramientas usadas en los registros de Densidad:

❖ Herramienta de Densidad Compensada (FDC)

Una fuente y dos detectores están situados en una barra de aproximadamente 3 pies de largos, que es forzada contra la pared del hoyo por un brazo hidráulico. Rayos gammas emitidos continuamente por una fuente son canalizados dentro de la formación, sufriendo múltiples colisiones con electrones, las cuales los hacen perder energía y moverse en todas las direcciones (CIED, 2001).

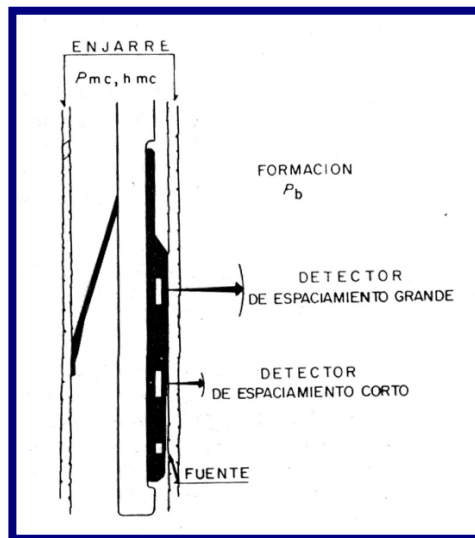


Figura 4.6. Principios Básicos de la medición: Los Rayos gammas son emitidos continuamente por una fuente, estos son canalizados dentro de la formación, debido a las múltiples colisiones con electrones pierden energía y se mueven en todas las direcciones.

❖ Herramienta de Lito-Densidad (LDT)

La herramienta de Lito-Densidad (LDT) es prácticamente la misma que su predecesora, el FDC; sin embargo, la operación es diferente. Con el LDT, las mediciones de densidad y factor fotoeléctrico son realizadas mediante selección por niveles de energía de los rayos gamma que incide en el detector lejano (CIED, 2001).

IV.1.6 Registro Sónico

Uno de los principales objetivos y aplicaciones de los registros acústicos o sónicos, es la obtención de la porosidad de la formación directamente, ya que las propiedades acústicas de la roca están íntimamente ligadas con su porosidad.

Este registro es una medida inducida por la velocidad de propagación de onda a lo largo de las rocas que se encuentran rodeando la perforación. La herramienta de registro sónico consta de un transmisor y dos receptores, que son colocados en la herramienta con un espaciamiento típico de 3 pies entre el transmisor y el receptor más cercano, y de 2 pies entre los receptores (CIED, 2001).

Un pulso de corriente o voltaje es aplicado al transmisor, éste genera un pulso de presión corto y oscilatorio a una frecuencia de alrededor de 25 kHz, en el lodo. Existen seis ondas diferentes viajando hacia arriba y hacia abajo en el hoyo: dos ondas superficiales a lo largo de la pared del hoyo, pseudo-Rayleigh y Stoneley.

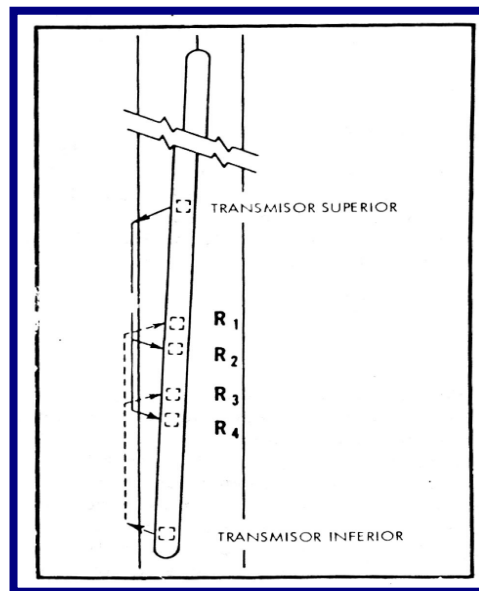


Figura 4.7. El dispositivo que actualmente se usa para obtener el registro sónico de porosidad consta de una sonda de material aislante acústico y cuatro receptores (R). Este sistema, designado como BHC (Bore Hole Compensated) por la Compañía Schlumberger, permite eliminar la mayor parte de los efectos de agujero tales como diámetro del pozo e inclinación de la sonda.

IV.1.7 Registro Neutrónico

Los perfiles neutrónicos son usados principalmente para ubicar formaciones porosas. Dichos registros responden principalmente a la cantidad de Hidrógeno presente en la formación (Segré, 2003).

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras, cuya masa es casi idéntica a la del átomo de Hidrógeno. Una fuente radioactiva, en este caso se trata de una muestra que emite neutrones, tal como Am-Be, colocada en la sonda que es el equipo que porta la fuente y el detector; emite continuamente neutrones a alta energía. Estos neutrones, al encontrarse con núcleos del material de formación, pierden energía, es decir, son moderados por la formación hasta que alcanza su estado térmico, en el cual su velocidad es similar a la de los átomos en el material y esto ocurre cuando los neutrones alcanzan la energía de 0.025 eV (WEC, 1997).

La cantidad de energía perdida, depende de la masa relativa del núcleo con el que colisiona, siendo la mayor pérdida cuando el neutrón choca con un núcleo prácticamente de igual masa, es decir; el Hidrógeno (Segré, 2003). De ésta manera la pérdida de energía dependerá principalmente de la cantidad de Hidrógeno en la formación.

A los pocos microsegundos de ser moderados los neutrones, alcanzan su estado termal, es decir, energías de 0.024 eV. Entonces son capturados por núcleos de átomos tales como: cloro, hidrógeno, sílice, etc.

Este exceso de energía, ocasiona que los núcleos absorbentes se excitan y originen una emisión de rayos gamma (radiación electromagnética) denominados Rayos Gamma de Captura para equilibrar aquel exceso energético recibido. De acuerdo al tipo de herramienta, ésta puede detectar los rayos gamma de captura o sus propios neutrones mediante un detector (o dos) colocado en la misma sonda.

Los equipos neutrónicos en uso incluyen el GNT, SNP y DSN. Las fuentes utilizadas que emiten neutrones con una energía inicial de varios millones de eV son las de Pu-Be ó Am-Be. El valor del tiempo muerto de los equipos, que es el tiempo en

que el detector no registra cuentas es de dos segundos y por lo tanto la velocidad de registro es de 1800 pie/hora ó 550mt/hora (Segré, 2003).

- ❖ El GNT es una herramienta que emplea un detector sensible a los rayos gamma de captura y a neutrones térmicos (con energía de 0.025 eV). Puede utilizarse en pozo abierto o entubado. La porosidad leída de un registro en pozo entubado es menos exacto debido a la densidad de la tubería de revestimiento, la presencia de cemento detrás de ésta y otros factores (Segrés 2003).
- ❖ En el SNP, la fuente y el detector de neutrones están colocados en una almohadilla en contacto con la pared del pozo. El detector es un contador proporcional, blindado de tal manera que sólo los neutrones con energía por encima de 0.4 eV pueden ser detectados (Segres, 2003).
- ❖ En el CNL, la herramienta neutrónica compensada, como observamos en la Figura 4.7, en la cual una fuente de neutrones rápidos está localizada cerca del extremo inferior de la herramienta, y dos detectores termales se encuentran sobre la fuente, espaciados $\frac{1}{2}$ pie (CIED,2001). La relación entre las ratas de pulsaciones del detector cercano y el lejano, N_n/N_f , es medido y relacionado a la porosidad de la formación.

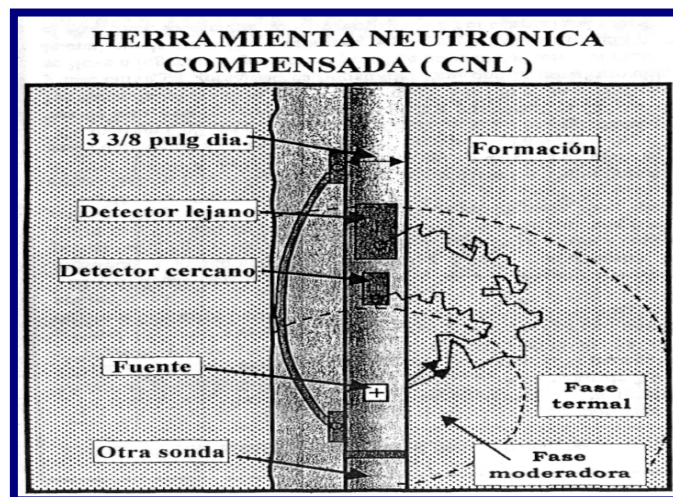


Figura 4.8. Herramienta neutrónica compensada: una fuente de neutrones rápidos está localizada cerca del extremo inferior de la herramienta, y dos detectores termales se encuentran sobre la fuente.

CAPÍTULO V

V.1 Metodología de Trabajo

Para llevar a cabo los objetivos planteados, se desarrolló una metodología que permite determinar el Exponente de Hurst en distintos tipos de registros de pozo mediante el Análisis de Rango Re-escalado de Hurst, dicha metodología se ha dividido en las siguientes etapas (Figura. 5.1):

1. Revisión bibliográfica.
2. Creación y diseño del algoritmo en Matlab.
3. Compilación, edición y normalización de registros de pozos.
4. Determinación del ancho de ventana y el desplazamiento
5. Corrida del programa y posterior suavizado de las curva de exponente de Hurst contra profundidad
6. Generación de volúmenes geoestadísticos de Exponente de Hurst.
7. Análisis de resultados.
8. Conclusiones y recomendaciones.

A continuación se describen de forma detallada todas las etapas de la elaboración del trabajo:

V.1.1 Revisión Bibliográfica

En esta primera etapa se realizó la búsqueda de libros y artículos referentes a la Geometría Fractal, pasando por los inicios de esta geometría, su evolución y comparación con la geometría tradicional. De igual forma se hizo una recopilación de artículos relacionados con el método de análisis de rango re-escalado de Hurst para determinar la dimensión fractal de una serie de datos geofísicos.

La etapa de la revisión bibliográfica nunca finalizó a lo largo del trabajo, ya que en la medida que se desarrollaba éste, la necesidad de mayor información y de comparación de algunos de los resultados era importante.

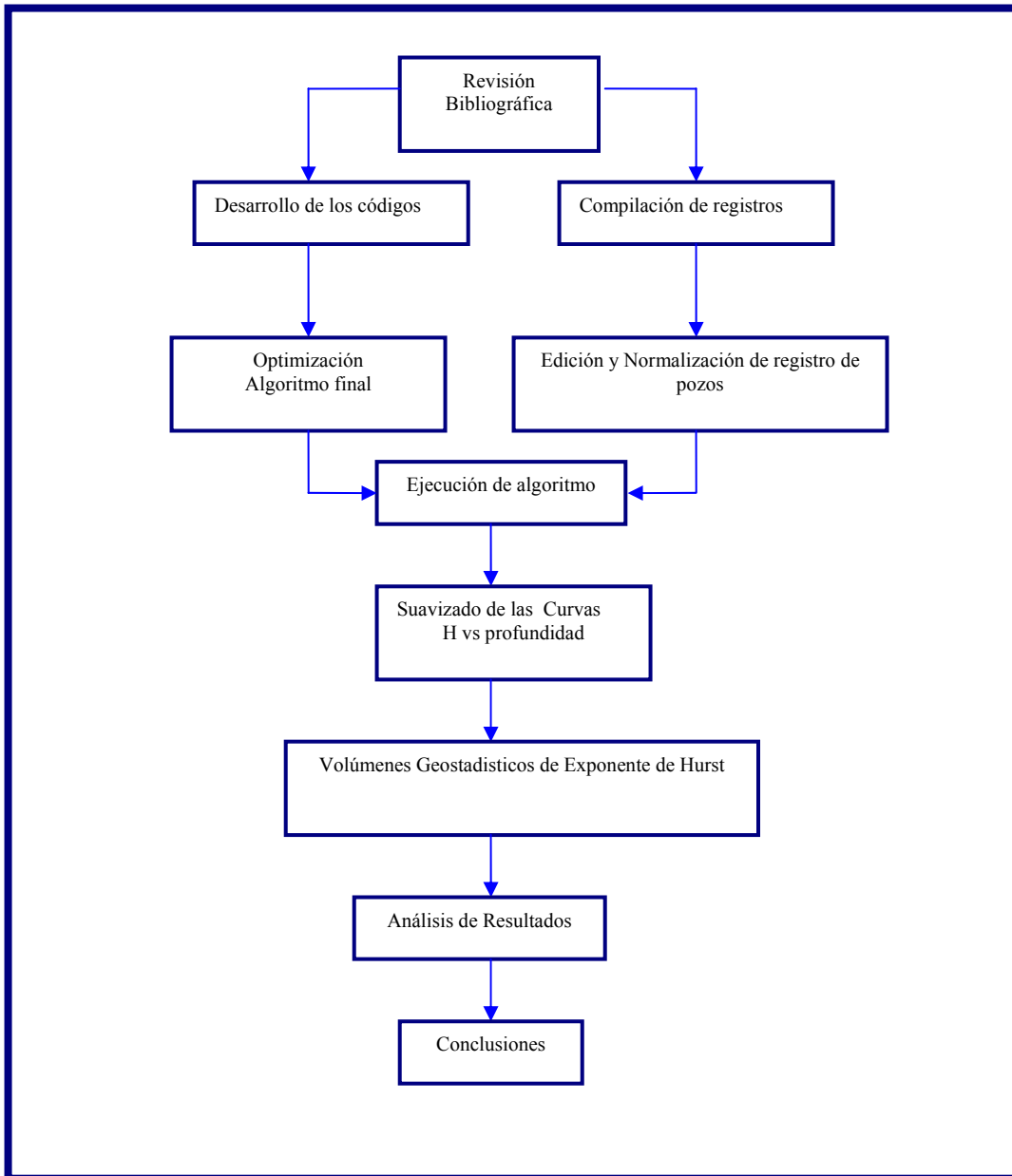


Figura 5.1. Esquema de la metodología del trabajo.

V.1.2 Creación y Diseño del algoritmo en Matlab

Para realizar el cálculo del exponente de Hurst en los distintos registros de pozos, fue necesaria la elaboración de algoritmos y rutinas para posteriormente desarrollar códigos que permitieran la realización de los cálculos en una forma automatizada.

Con esta finalidad, se utilizó el programa Matlab, por ser, una herramienta de alto nivel y que permite el desarrollo de programas numéricos con un requerimiento de esfuerzo mínimo comparado al de otros lenguajes de programación.

Posteriormente a la elaboración de los códigos en Matlab se llevó a cabo la comprobación de los mismos, con el objeto de verificar su correcto funcionamiento. En primer lugar se realizaron análisis con datos sintéticos, los cuales fueron procesados en Microsoft Excel y luego por el programa de Matlab con el objeto de realizar un control de calidad entre los resultados obtenidos.

V.1.2.1 Optimización de los Códigos

El algoritmo diseñado, con el cual se generó el código para realizar el análisis de rango en cambio de escala consta de 6 fases (Figura 5.2):

- ❖ Lectura de los datos.
- ❖ Elección del rango de datos.
- ❖ Creación de una ventana que despliega los distintos registros presentes en el pozo.
- ❖ Elección de un registro de pozo en particular, así como la ventana y desplazamiento con el cual se desea hacer el análisis.
- ❖ Análisis de rango en cambio de escala y cálculo del exponente de Hurst.
- ❖ Despliegue de la gráfica del exponente de Hurst calculado para cada ventana con su respectivo valor de profundidad, así como un archivo en formato ASCII con los datos de la gráfica anteriormente mencionada.

Se realizaron todos los cambios pertinentes en los códigos para conseguir un comportamiento más eficaz del programa. Finalmente los códigos fueron terminados y optimizados en su totalidad, obteniendo 2 archivos con extensión *.m; uno para la lectura de los datos y la salida del programa y otro para el cálculo del exponente de Hurst.

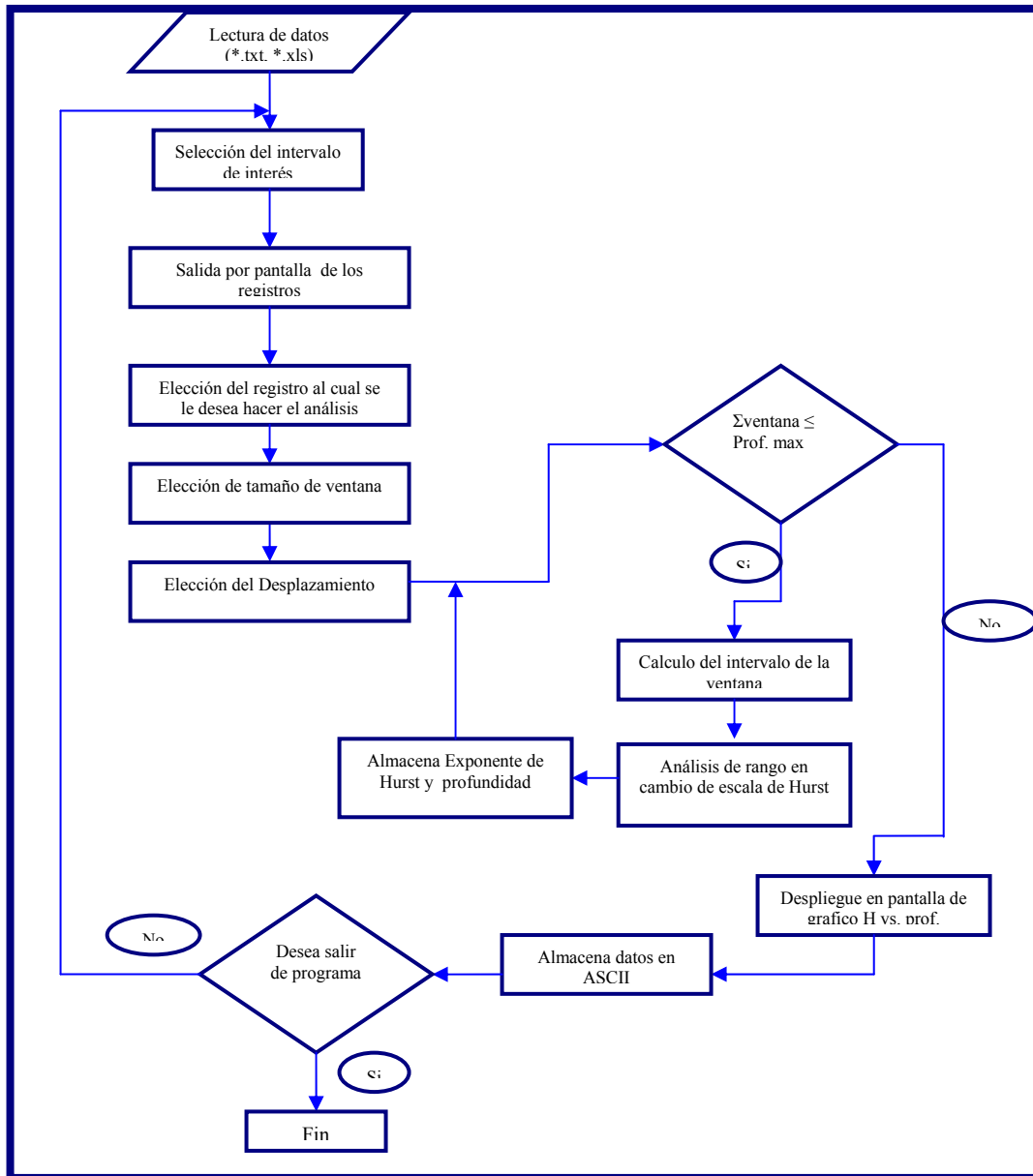
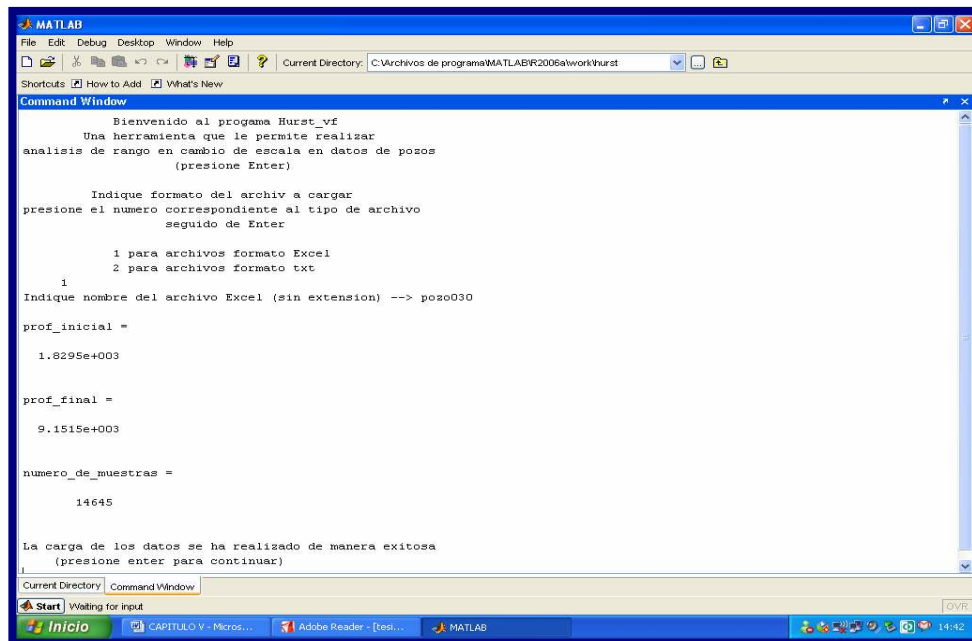


Figura 5.2. Diagrama de flujo del código usado para el análisis de rango en cambio de escala.

❖ Lectura de los datos

Se realiza la lectura de los datos que se van a cargar, para ello es necesario que el usuario especifique la extensión de los mismos; el programa tiene la capacidad de leer archivos de formato ASCII ya sea *.txt o *.xls como se muestra en la figura 5.3. Para la carga de datos, la lectura es sencilla y está basada en funciones elementales del lenguaje de programación.



```

MATLAB
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Archivos de programa\MATLAB\R2006a\work\Hurst

Command Window

Bienvenido al programa Hurst_vf
Una herramienta que le permite realizar
analisis de rango en cambio de escala en datos de pozos
(presione Enter)

Indique formato del archiv a cargar
presione el numero correspondiente al tipo de archivo
seguido de Enter

    1 para archivos formato Excel
    2 para archivos formato txt

1
Indique nombre del archivo Excel (sin extension) --> pozo030
prof_inicial =
    1.8295e+003

prof_final =
    9.1515e+003

numero_de_muestras =
    14645

La carga de los datos se ha realizado de manera exitosa
(presione enter para continuar)

Current Directory: Command Window
Start | Waiting for input | OVR
Inicio | CAPITULO V - Micros... | Adobe Reader - [Escri... | MATLAB | 14:42
```

Figura 5.3. Lectura de los datos. El usuario debe escoger el tipo de formato que poseen sus datos posteriormente, introducir el nombre del archivo. En pantalla se imprimirá los valores máximos y mínimos de la profundidad en dicho archivo.

❖ Elección del rango de datos para realizar el cálculo

La elección del rango de los datos le permite al usuario escoger el intervalo de estudio de su elección; esto se realiza tomando un valor mínimo que representa la profundidad, y un valor máximo que indica hasta donde llega el mismo. La elección de estos dos valores hace que el programa construya una matriz que posee un número de filas que van desde el valor mínimo al valor máximo. El número de columnas

depende del número de registros que contenga el archivo. En la figura 5.4, se puede observar que el programa indica el número de columnas y filas que posee el archivo.

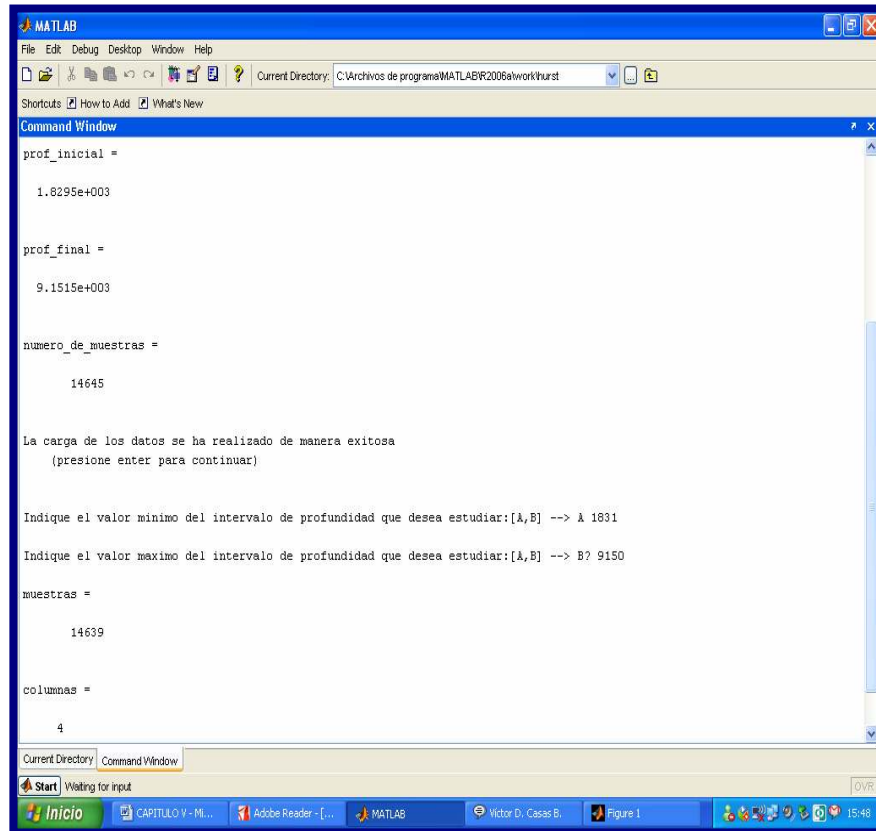


Figura 5.4. Elección del Rango de Interés. El programa brinda al usuario la posibilidad de escoger el rango de profundidad al que se desea aplicar el análisis. Una vez cargado el rango de profundidad se imprime en pantalla el número de filas y columnas presentes en los datos.

❖ Despliegue del gráfico de los registros del pozo

Se despliega una ventana con las gráficas de todos los registros en función de la profundidad, en donde cada gráfico lleva por título el número de la columna que representa dentro del archivo. La escala del eje “Y” se despliega una sola vez en el primer gráfico porque representan la misma escala para todos los demás. En la figura 5.5 se puede observar un ejemplo de lo antes descrito.

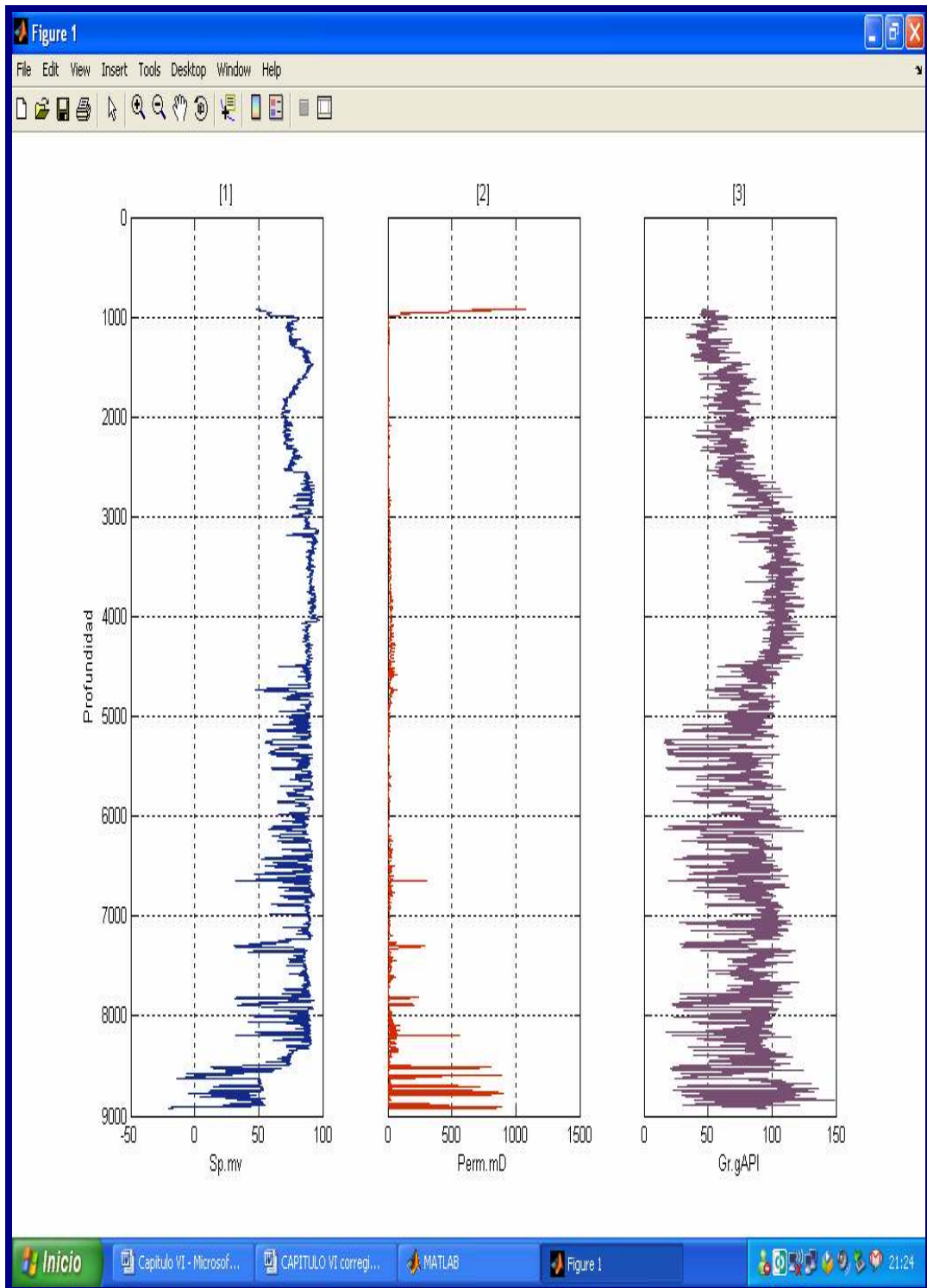


Figura 5.5. Despliegue de los tres registros petrofísicos presentes en el pozo: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma. La escala del eje “y” es desplegada sólo en el primer gráfico debido a que la escala es la misma para las tres gráficas

❖ Elección del Registro, Ventana de muestreo y Desplazamiento

El usuario escoge el número de columna al cual pertenece al registro de pozo, en particular al que desea realizar el estudio, se encuentra en la parte superior de cada gráfica.

El Exponente de Hurst es calculado para distintas profundidades, esto con el propósito de hacer un estudio más detallado. El programa está provisto de una variable que le brinda al usuario la oportunidad de decidir con cual ventana de profundidad desea trabajar y el desplazamiento de dicha ventana. (Figura5.6)

Luego de la elección del registro se introduce el ancho de ventana, de esta forma se tiene un proceso análogo al descrito en la elección del rango de interés. Partiendo del valor mínimo de profundidad hasta el valor correspondiente al ancho de ventana se obtiene una matriz con el número de filas respecto al ancho de ventana, es decir, si tomamos un ancho de ventana de 400pies y el estudio se realizó cada 0,5 pies, se genera una matriz con 800 filas con dos columnas una referida a la profundidad y otra al valor de la propiedad medida.

En cada iteración el programa va desplazando la ventana a lo largo de la profundidad del registro con un valor constante que es introducido por el usuario.

❖ Análisis de rango re-escalado y cálculo del Exponente de Hurst

Con el ancho de ventana en cada iteración se obtiene una matriz en donde la primera columna es la profundidad del intervalo y la segunda contiene los datos.

En cada una de las iteraciones, a la columna dos se le aplica el análisis de rango re-escalado explicado en el capítulo III. Como resultado de este análisis se obtienen dos columnas; la primera indica el \log_{10} de la cantidad $N/2$ de muestras y la segunda el \log_{10} de R/S con lo que se construye la gráfica mostrada en la figura 5.7.

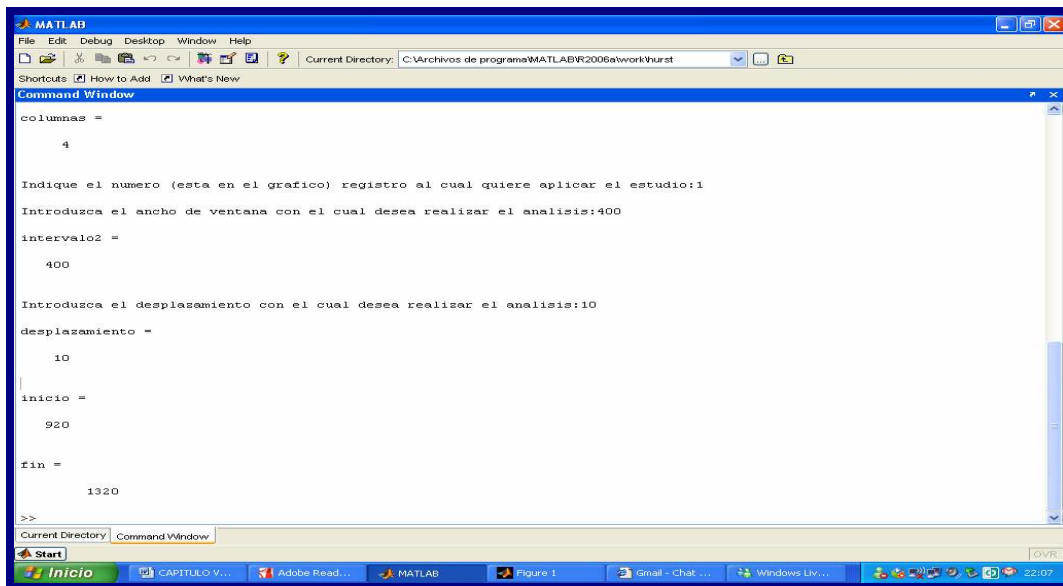


Figura 5.6. Elección de registro, ventana y desplazamiento. Luego del despliegue de la grafica con los diferentes registros de pozo, el usuario escoge cual de los registros desea analizar, introduciendo el número de cada registro que se encuentra en la parte superior de cada registro.

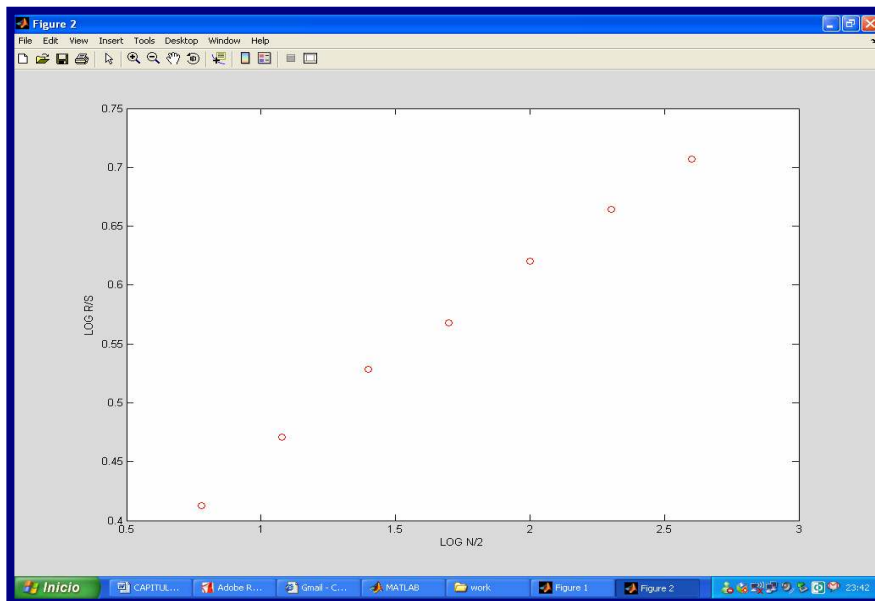


Figura 5.7. Gráfica de Log R/S vs. Log N/2. La curva presenta un comportamiento lineal, lo que indica que las propiedades petrofísicas medidas por el registro de pozo, posee un comportamiento fractal.

Para el cálculo del Exponente de Hurst, se realiza el ajuste lineal dando la ecuación de la recta correspondiente, en donde el coeficiente que acompaña a “ X ” es la pendiente de la recta y respectivamente el exponente de Hurst.

El valor de la pendiente de la recta es mostrado en pantalla y guardado en una matriz conjuntamente con el promedio de profundidad del intervalo. En la figura 5.8 se observa el valor del exponente de Hurst “ H ” conjuntamente con el valor promedio del intervalo de profundidad en el cual se calculó H .

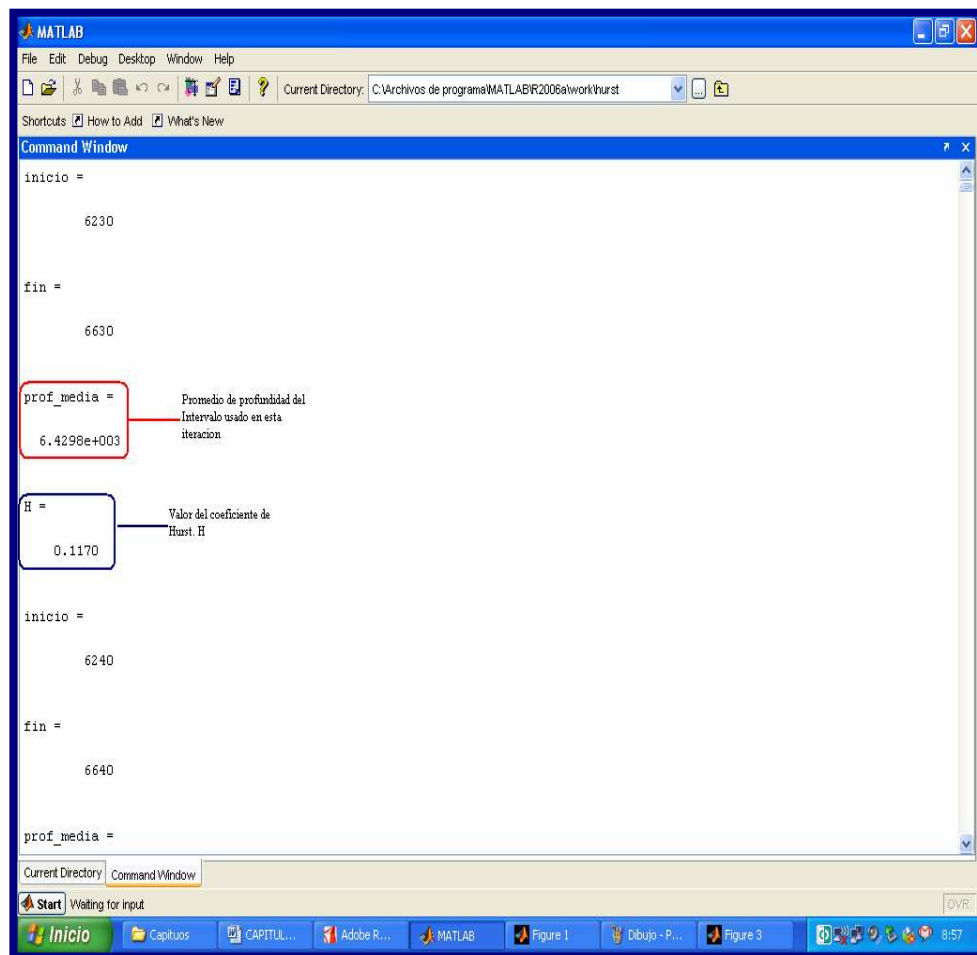


Figura 5.8. La gráfica muestra la salida en pantalla de H y el promedio de profundidad. Para cada iteración se muestra el inicio y el final del rango correspondiente al ancho de ventana antes escogido.

❖ Despliegue de la gráfica del exponente de Hurst contra el promedio de profundidad.

Como salida del programa se obtiene una gráfica como la mostrada en la figura 5.9 en la cual se puede observar el comportamiento del exponente de Hurst de la propiedad petrofísica medida.

Los datos que generan esta grafica son exportados a un archivo de formato ASCII, para su posterior utilización en otras etapas de la metodología del trabajo.

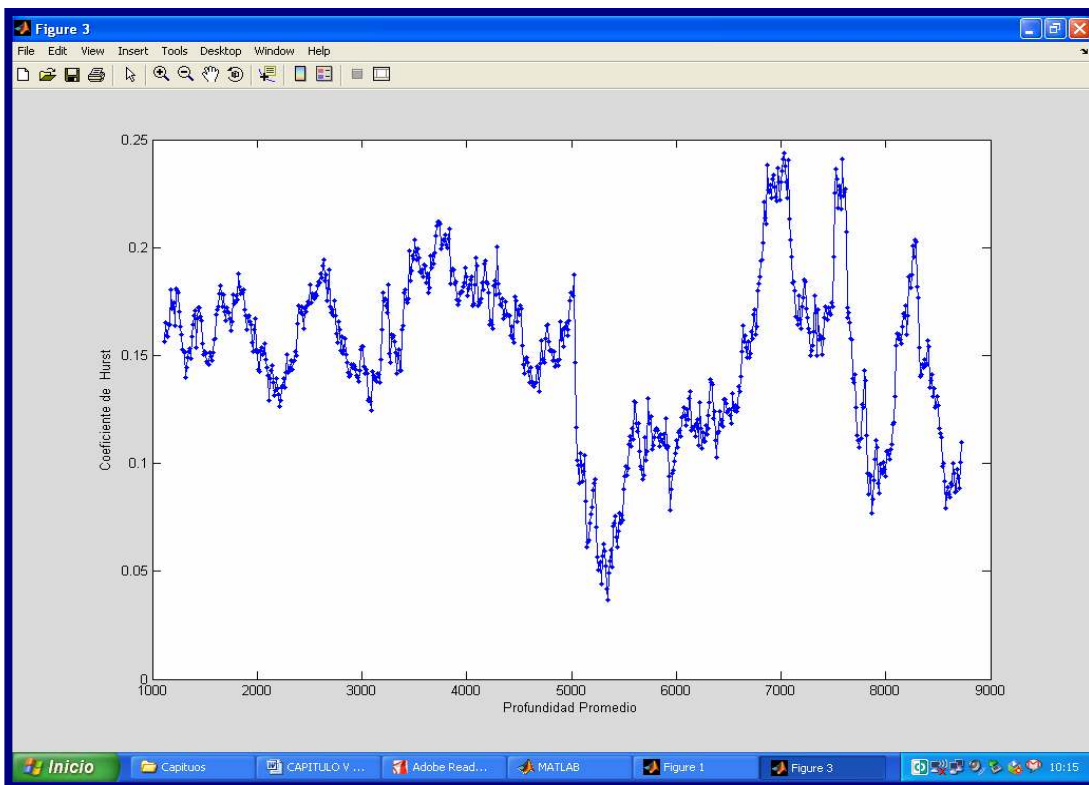


Figura 5.9. Grafica del exponente de Hurst vs. Profundidad. Esta grafica nos permite observar el comportamiento del exponente de Hurst de la propiedad petrofísica medida. Dependiendo los valores de H se puede establecer si el proceso estudiado es aleatorio, o si presenta comportamiento persistente o antipersistente.

V.1.3 Compilación, Edición y normalización de Registros de Pozos

El registro de Rayos Gamma nos permite medir litología, el mismo es usado como un registro de correlación asociando la estratigrafía de un pozo hacia pozos vecinos. Ya que el objetivo de este trabajo es establecer si existe correlación entre el Exponente de Hurst y la estratigrafía, el registro de Rayos Gamma es el indicado para este estudio.

Se disponen de 163 pozos de una zona de la Cuenca Orienta de Venezuela, el intervalo principal que se estudia en los registros es la Formación Oficina. Posteriormente se hizo la compilación de todos aquellos pozos que tuviesen registro de Rayos Gamma reduciendo la cantidad de los mismos a 89.

Luego se realizó una revisión de estos 89 pozos detectando 16 pozos que presentaban irregularidades en los datos, o bien el intervalo de estudio no era suficientemente grande para observar un valor estable del exponente de Hurst. De esta forma sólo quedaron 79 pozos para realizar el estudio.

Además del registro de Rayos Gamma, se le realizó el estudio a los registros de Potencial Espontáneo y de Permeabilidad, con el objeto de verificar si existe una relación entre el exponente de Hurst y los registros independientemente al parámetro que se mida. De los 79 pozos seleccionados 70 poseen registro de Potencial Espontáneo y 28 pozos tienen registros de Permeabilidad.

Los 79 pozos fueron convertidos de formato *.LAS a formato.*ASCII para poder ser leídos por el programa, fue eliminado el “Header” así como los registro presentes que no fueran de interés de este estudio en cada uno de los archivos.

Posteriormente se procedió a verificar el intervalo de profundidad de valores efectivos del registro para ser cargados en el programa.

Finalmente fue normalizado el registro de Rayos Gamma. En estos registros se tiene una línea base y una línea tope, la línea base es el valor más bajo en gAPI, representa arenas limpias y el tope es el valor más alto en gAPI, representa la línea de lutitas. Se tomó como referencia la línea base y la línea tope del registro GR correspondiente al Pozo003 y las líneas de tope y base de los demás registros fueron llevados a estos valores.

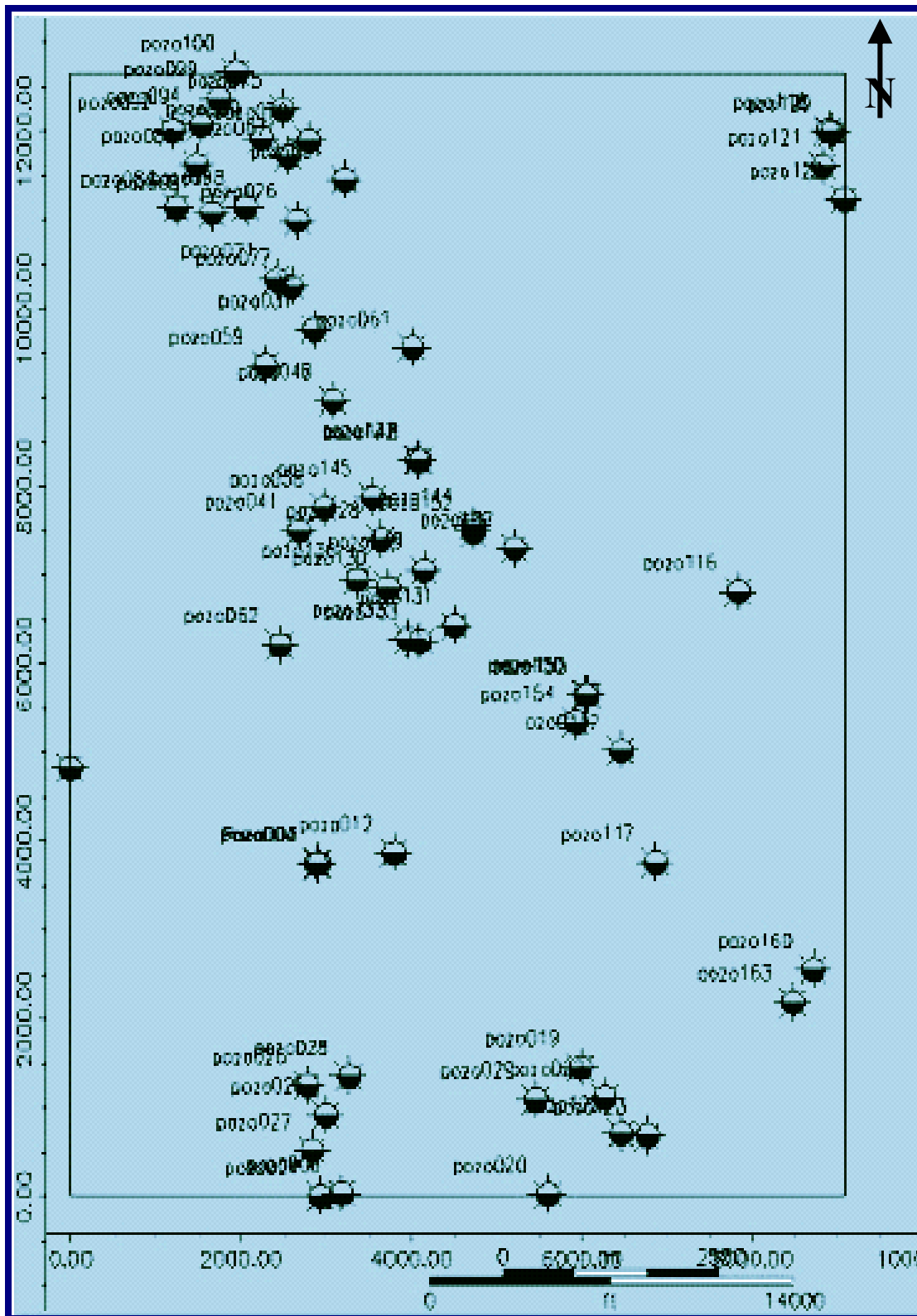


Figura 5.10. Mapa con la distribución de los pozos escogido.

V.1.4 Determinación del Ancho de Ventana y Desplazamiento

Para determinar el ancho de ventana y el desplazamiento que se usaría, se tomo como referencia el registros de Rayos Gamma del Pozo003, se realizaron varias corridas del programa con diferente valores de ancho de ventana (200', 400', 600', 800' y 1000'); para cada ancho de ventana se tomaron 3 valores de desplazamiento diferentes (10, 100, 900), Todas las gráficas obtenidas se correlacionaron con la geología dando como resultado que la ventana de 400' y un desplazamiento de 10' tenia mejor correlación, además el calculo del exponente de Hurst es mas estable y coherente con la litología. De esta forma se usó una ventana de 400' con un desplazamiento de 10' para todo el estudio. En la Figura 5.11 se muestra la graficas con los distintos tipos de ventana y con un desplazamiento de 10' que fue el desplazamiento que ofrece más información para correlacionar con la geología.

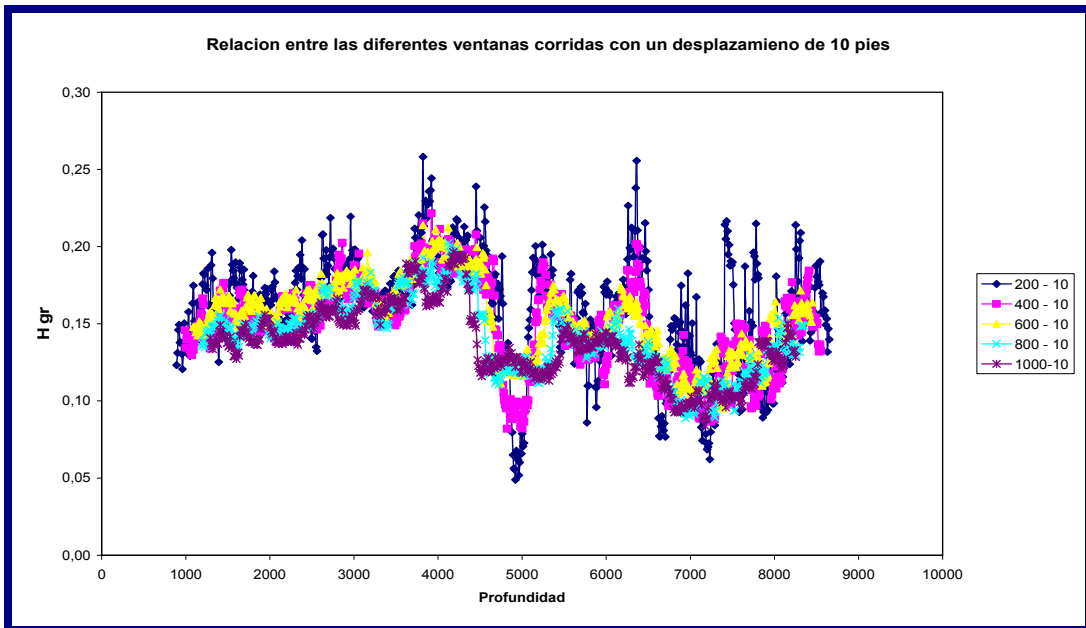


Figura 5.11. En la gráfica se muestra el comportamiento de la Curva Hgr vs profundidad para cada una de las ventanas representada por los distintos colores, en este caso el desplazamiento usado en cada una de las curvas es de 10'. La curva rosada representa los cálculos efectuados con una ventana de 400' y un desplazamiento de 10' que fue el utilizado para todo el procesamiento de los registros de pozos.

V.1.5 Corrida del Programa y Suavizado de las Curvas

Una vez terminado el proceso de compilación, edición y normalización, se procedió a correr los 79 pozos obteniendo como resultado una curva de H contra Profundidad para cada uno de los registros, así como también un archivo en formato ASCII con los datos de las curvas de cada uno de los registros.

A los cálculos iniciales del exponente de Hurst se le aplicó un filtro medio de 5 muestras para suavizarlos. En la figura 5.12 se puede observar un ejemplo de la curva suavizada y sin suavizar.

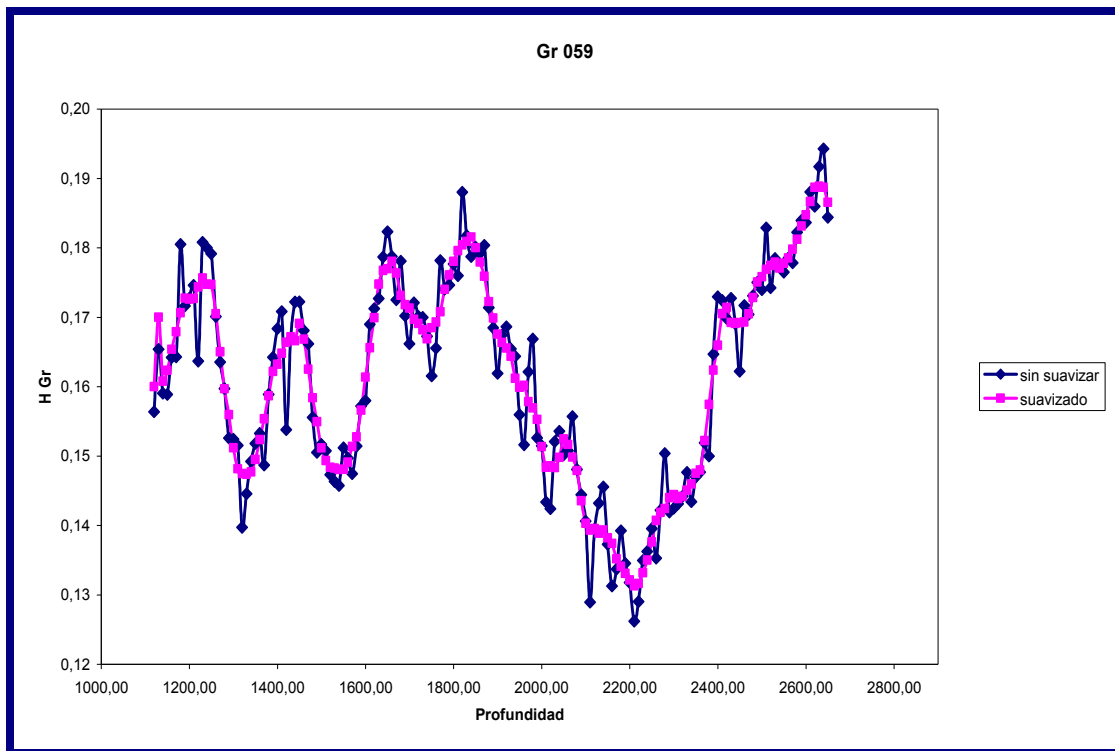


Figura 5.12 Comparación entre curva suavizada y la misma curva sin suavizar. Para una mejor visualización de la diferencia entre las dos curvas de H vs profundidad, se graficó solo 1000' de profundidad. La curva azul representan los valores sin suavizar y la línea rosada es la curva ya suavizada.

V.1.6 Generación de Volúmen geoestadístico de exponente de Hurst

V.1.6.1 Geoestadística

Para la generación de los volúmenes geoestadísticos de exponente de Hurst es de suma importancia conocer algunos conceptos básicos de la geoestadística, debido que de esta forma se facilita la comprensión del estudio realizado.

Matheron, el impulsor del formalismo matemático de la Geoestadística, definió esta ciencia como “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (1962).

Originalmente, Matheron (1971) desarrolló los métodos geoestadísticos para resolver problemas asociados con el cálculo de “promedios ponderados” acerca del nivel de minerales contenidos en bloques geológicos. Estos métodos se crearon con la finalidad de estimar incertidumbres locales e irregularidades en las variaciones de una propiedad o atributo geofísico que se mide en ciertos puntos muestrales. Dichas medidas están íntimamente ligadas con el aspecto estocástico de las variaciones en cuestión.

A lo antes descritos se le encuentra en la literatura geoestadística bajo el título de “Teoría de Variable Regionalizada”. Se define formalmente la variable regionalizada como una variable distribuida en el espacio de forma que presenta una estructura espacial de correlación (autocorrelación).

Desde un punto de vista matemático, una variable regionalizada es simplemente una función $f(x)$ que tiene un cierto valor para todas las coordenadas x (en un espacio de 1, 2 o 3 dimensiones). Una variable regionalizada tiene dos aspectos aparentemente contradictorios (Moral y Márquez, 2002):

- Un aspecto general estructurado, el cual puede caracterizarse con una función determinística.
- Un aspecto errático, aleatorio, local, el cual representa una variación impredecible de un punto a otro.

La representación de la variación espacial de una variable regionalizada se realiza mediante la suma de tres componentes:

$$Z(x) = m + \varepsilon'(x) + \varepsilon''(x) \quad (\text{V.1})$$

Donde $Z(x)$ el valor de la variable en la posición x , m representa la función determinística (la media o cualquier tendencia espacial), $\varepsilon'(x)$ la componente correlacionada espacialmente pero localmente variable, y $\varepsilon''(x)$ un término de error residual distribuido normalmente, o ruido aleatorio, con una media nula y una varianza $\sigma^2(x)$, siendo espacialmente independiente (Moral et al., 2002).

Matheron en la década de los 60 desarrolló las hipótesis intrínsecas. Éstas asumen que los incrementos de la función son “débilmente” estacionarios, o sea, la media y la varianza de los incrementos, $Z(x+h)-Z(x)$, existen y son independientes del punto x :

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (\text{V.2})$$

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (\text{V.3})$$

V.1.6.2 Fases en un estudio geoestadístico. Métodos de interpolación utilizados

En todo trabajo geoestadístico cabe distinguir tres etapas (Moral et al., 2002):

- ❖ **Análisis exploratorio de los datos.** En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Es una etapa de aplicación de la estadística. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose aquellos que sean erróneos, y se identifican las distribuciones de las cuales provienen.

- ❖ Análisis estructural. Se estudia la continuidad espacial de la variable. En esta etapa se calcula el variograma experimental, o cualquier otra función que nos explique la variabilidad espacial, se ajusta a los datos un variograma teórico y se analiza e interpreta dicho ajuste al modelo paramétrico seleccionado.
- ❖ Predicciones. Estimaciones de la variable estudiada en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas u observadas. También se pueden realizar simulaciones, teniendo en cuenta los patrones de continuidad espacial elegidos.

En estas tres etapas, el análisis estructural es de suma importancia debido a que la obtención de los modelos geoestadísticos realistas conllevan un estudio riguroso del variograma.

A partir de los datos disponibles, el variograma se estima como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (\text{V.4})$$

siendo $Z(x_i)$ los valores muestrales en los puntos x_i , en los que se tiene datos tanto en x_i como en x_i+h ; $N(h)$ es el número de pares de datos separados por una distancia h .

Variable Experimental: se define un número finito de distancias, h_j , y se asignan al cálculo de $\gamma(h_j)$ todos los pares de valores contenidos en el intervalo $(h_j - \Delta h_j, h_j + \Delta h_j)$. Se selecciona una cierta tolerancia sobre la distancia, definiéndose un intervalo como el indicado con anterioridad, y otra tolerancia en la dirección. La representación de los valores seleccionados en cada región $\gamma(h)$ frente a h considerándose una distancia media.

Una vez definidos los puntos del variograma experimental, es necesario ajustar un modelo teórico a dichos puntos. Esto se debe a la imposibilidad de trabajar con un variograma como el experimental, carente de una función matemática precisa (o al menos difícil de caracterizar), y a la necesidad de extender los valores del variograma más allá de la distancia máxima definida.

Variograma teórico: Los modelos básicos más usados se desarrollan construyendo matemáticamente una función aleatoria y calculando su variograma teóricamente, imponiéndose la condición de funciones condicionadas positivas. Los más habituales son el esférico, el exponencial, el gaussiano, el efecto pepita, el potencial y el lineal.

Para la realización de las predicciones se usan normalmente algoritmos del método de interpolación óptima, denominados genéricamente “kriging”.

V.1.6.3 Generación de Volumen Geostadístico

Uno de los objetivos de este trabajo es establecer si existe correlación entre el exponente de Hurst y la sedimentación. Varios tipos de registros permiten delimitar superficies y discriminar litología: Registro de Resistividad, Registro de Potencial Espontáneo, Registro de Rayos Gamma, Registro Sónico, Registro de Densidad y Registro Neutrónico

Para la generación del Volumen Geostadístico de Hurst, se determinó que el registro que brinda mejor información para correlacionar con la estratigrafía es el registro de Rayos Gamma, en la tabla 5.1 se describen los problemas que presentan los diferentes registros de pozo

El registro de Rayos Gamma permite inferir litología, debido a que las rocas sedimentarias contienen elementos radioactivos en cantidades variables y típicamente, las arenas limpias contienen baja cantidad de estos elementos, mientras que las arcillas o lutitas una cantidad considerablemente mayor. Son los más usados en la estratigrafía secuencial. En la figura 5.13 se observa la correlación de registro Rayos Gamma y ambientes de depositación.

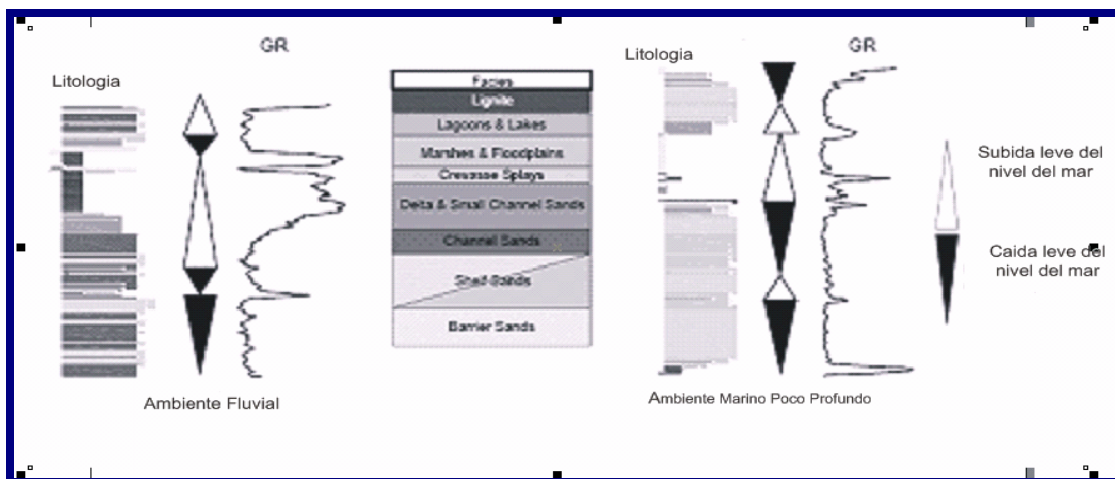


Figura 5.13. Se muestran 2 secuencias sedimentarias, una secuencia fluvial y la otra marino poco profundo. Al centro de la figura se muestran las facies de los respectivos ambientes depositacionales. Estos ambientes son determinados con registros de pozos geofísicos, específicamente Registro de GR. Los diagramas en forma de triángulo describen los ciclos del nivel del mar.

Tabla 5.1. Potenciales Problemas de los Registros de Pozo que pueden influir en la determinación del exponente de Hurst y su posterior correlación con la Estratigrafía.

Registro de Pozo	Potenciales Problemas
Resistividad	<ul style="list-style-type: none"> ●Presenta problemas dependiendo del fluido del lodo ●Problemas con capas delgadas
Potencial Espontáneo	<ul style="list-style-type: none"> ●La presencia de hidrocarburos reduce los valores del Potencial espontáneo. ●Presenta problemas en presencia de capas delgadas
Sónico	<ul style="list-style-type: none"> ●La medición es influenciada por la presencia de Gas
De Densidad	<ul style="list-style-type: none"> ●La medida de densidad es influenciada por el grado de compactación, y la presencia de hidrocarburos, arcillas y minerales
Neutrónico	<ul style="list-style-type: none"> ●La medición es influenciada por la presencia de Gas
Rayos Gamma	<ul style="list-style-type: none"> ●Este registro no presenta problemas para este tipo de análisis.

Para generar el volumen geostadístico de Hurst a partir de registros de Rayos Gamma, se usó el programa Geostatistical Volumen Creation y para la visualización del mismo se uso el programa VoxelGeo, ambos programas pertenecientes a la compañía Paradigm. A continuación se detallan los pasos para la elaboración de dicho Volumen:

- ❖ **Modelo Geométrico:** Habitualmente para la elaboración del modelo geométrico se emplea información de los horizontes provenientes de las secciones sísmica, de esta forma, el modelo geométrico se elabora en función de las estructuras presentes en la zona de estudio. Desafortunadamente no se contaba con la información de los horizontes, así que se usó un modelo geométrico constante. No obstante, la zona de estudio no presenta deformación estructural y posee buzamientos suaves lo cual permite usar dicho modelo sin inconvenientes. En la figura 5.14 se observa la ventana desplegada para la carga del modelo geométrico.

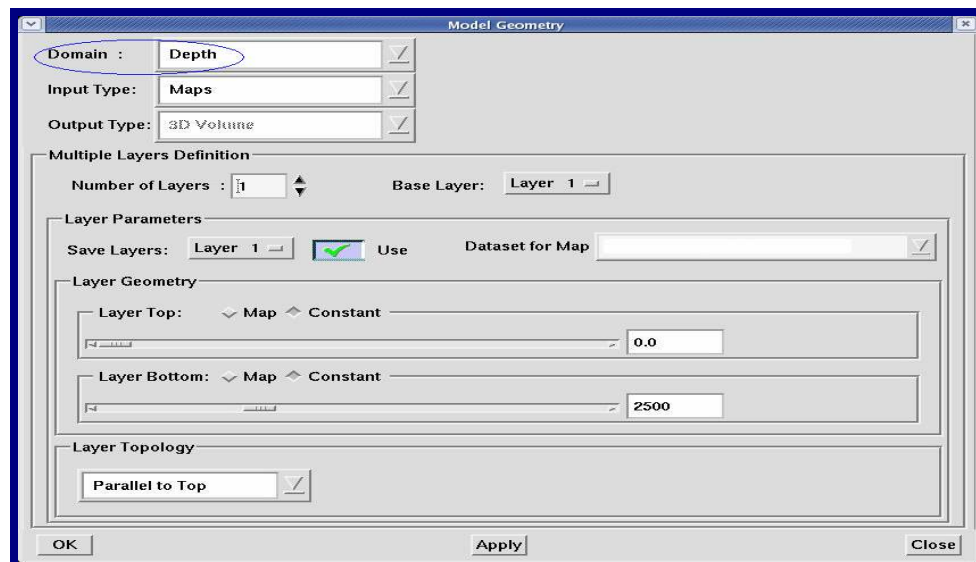


Figura 5.14. Generación del modelo Geométrico en el dominio de la profundidad. Se uso un modelo constante en el dominio de la profundidad, debido a que no se disponía de la información estructural de la zona.

- ❖ En el segundo paso se seleccionaron los registros de Rayos Gamma de los 16 pozos para generar el volumen (Figura 5.16), estos fueron cargados en el programa Geostatistical Volumen Creation (Figura 5.15). Se usó el método uniforme para la propagación de los valores, la figura 5.14 se muestra el proceso de propagación uniforme.

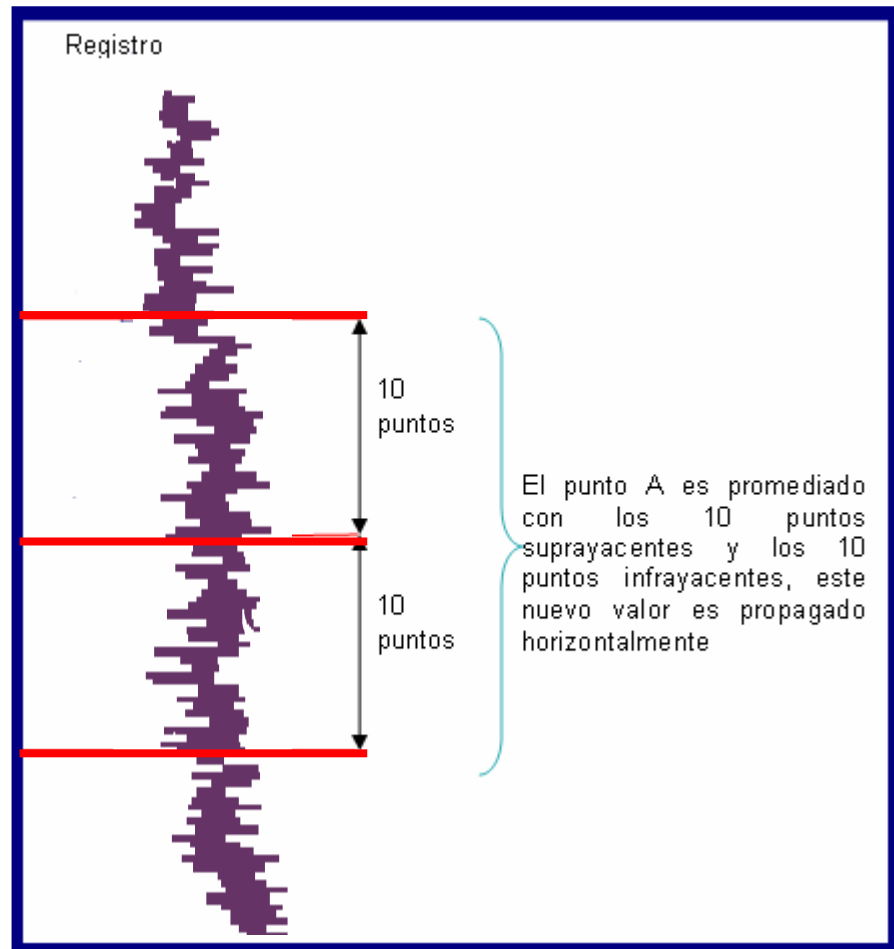


Figura 5.15. Proceso de propagación uniforme. Este proceso fue el usado para generar el volumen geoestadístico del exponente de Hurst basada en las propiedades petrofísica de las mediciones realizada por los registros de Rayos Gamma.

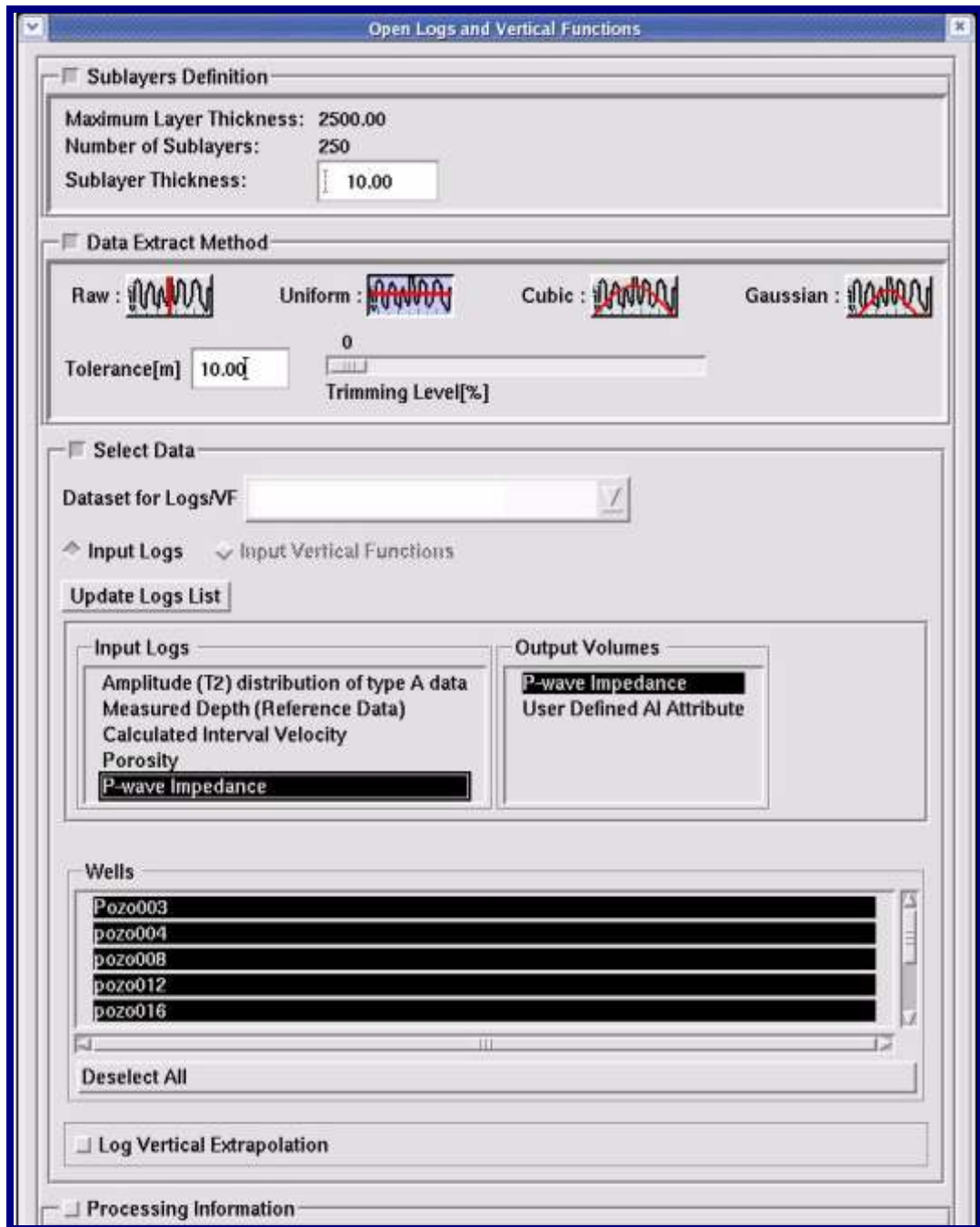


Figura 5.16. Carga en el Programa de los Valores de H, Obtenidos de los registros de Rayos Gamma. Se comprobó la consistencia de los datos de exponente de Hurst de los 79 pozos datos, fueron eliminados aquellos que eran erróneos, Quedando 16 pozos con datos de H para la generación del volumen.

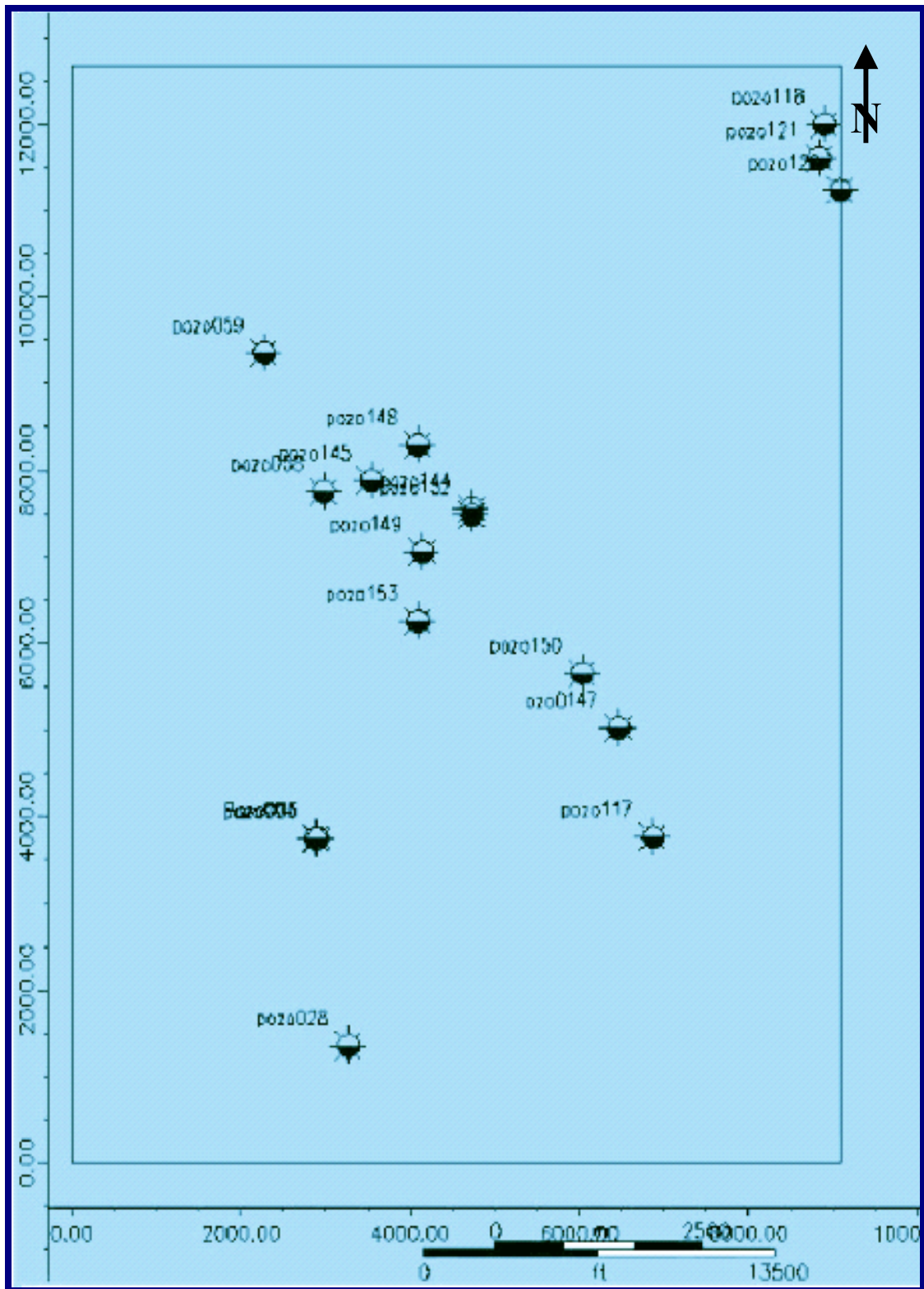


Figura 5.17. Ubicación de los 16 pozos usados para generar el Volumen Geoestadístico del Exponente de Hurst.

- ❖ Finalmente se generó el semivariograma. Se usó el modelo exponencial. En la Figura 5.17 se muestra el semivariograma obtenido.

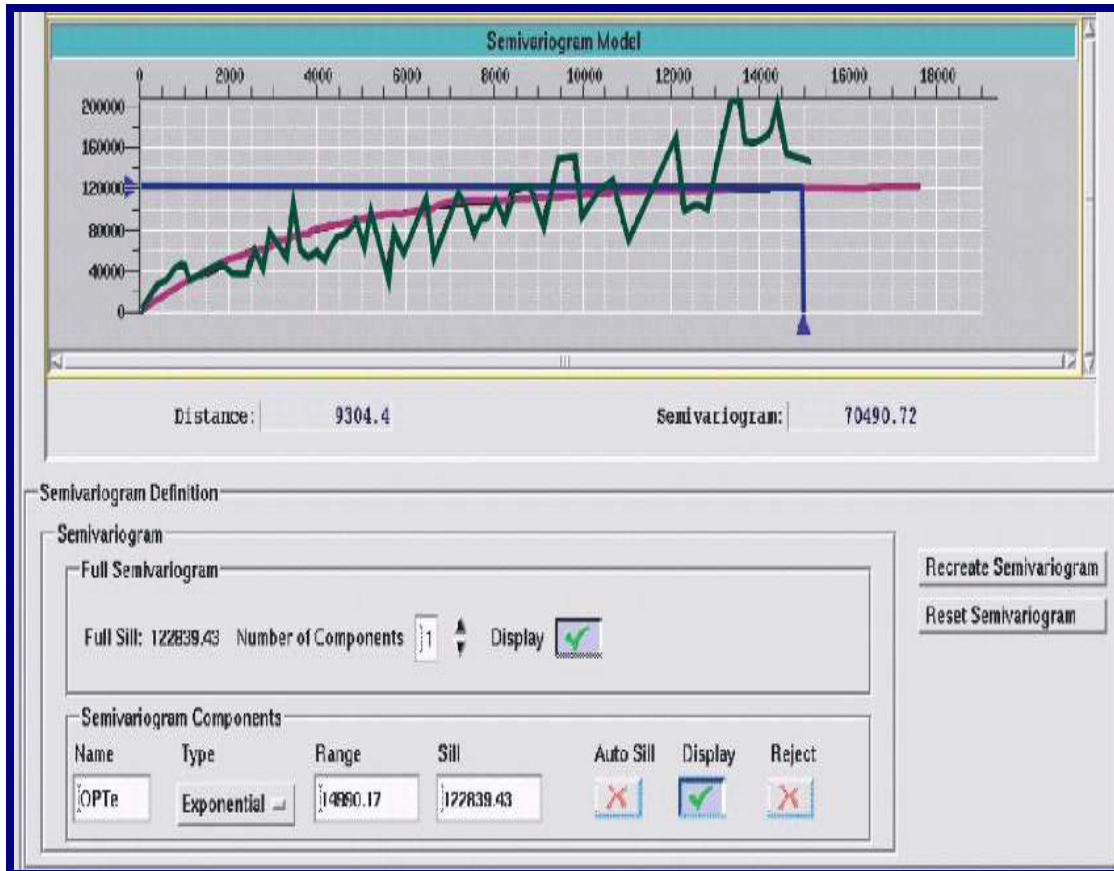


Figura 5.18. Semivariograma aplicado a los datos, El semivariograma es una herramienta básica de soporte de las técnicas de kriging, que permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio.

CAPÍTULO VI

VI.1 Resultados y Análisis

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de la aplicación de la metodología explicada en el capítulo anterior.

VI.1.1 Presentación de las diferentes Curvas de H vs. Profundidad

Todas las curvas de H obtenidas presentan un comportamiento similar. En esta sección se presentan sólo 5 pozos significativos con los resultados de las curvas de H en función de la profundidad.

Pozo003

Este pozo consta de tres registros: Potencial Espontáneo, Permeabilidad y Rayos Gamma, en la Figura 6,1 se observa el despliegue de dichos registros.

El análisis del registro de Potencial espontáneo se realizó en una profundidad de 792' a 8754'. Este registro presenta un proceso antipersistente (un proceso antipersistente, es aquel, en donde una tendencia de aumento en el pasado implica una tendencia a disminuir en el futuro y viceversa, es decir procesos de correlación negativa). Como se observa en la gráfica 6.2 en la sección A el Exponente de Hurst varía entre 0,22 y 0,01 a lo largo de toda la profundidad.

El registro de Permeabilidad se analizó en una profundidad de 5000' a 8752', como el caso anterior evidencia un proceso antipersistente, con un Exponente de Hurst que varía entre 0,48 y 0,14 (Figura. 6.2 B).

El registro de Rayos Gamma fue analizado desde los 792' hasta los 8752', como en los dos registros anteriores se observa un proceso antipersistente con valores

de H que varían entre 0,20 y 0,09 como se puede verificar en la sección C) de la Figura 6.2

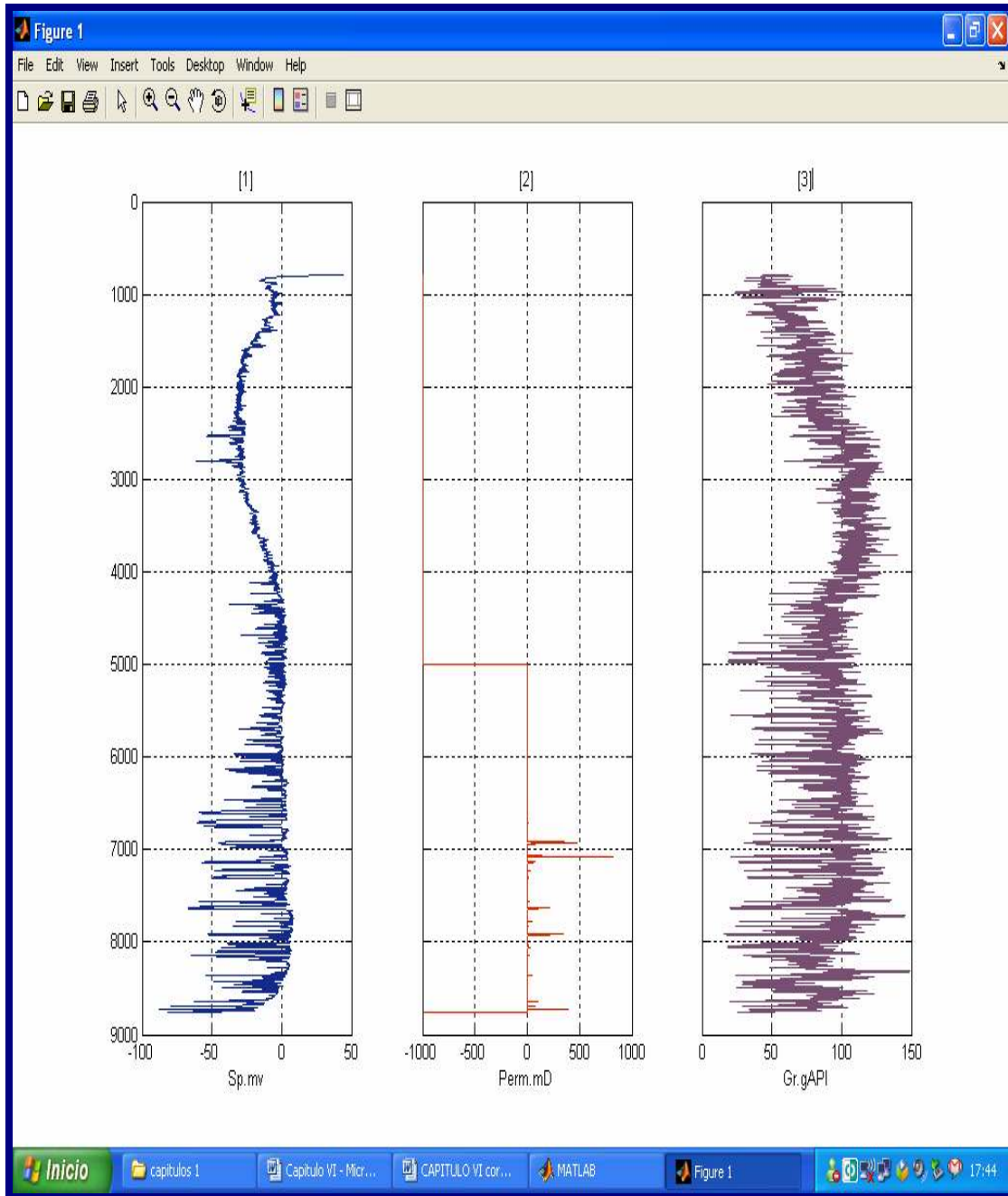


Figura. 6.1. Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo003: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma.

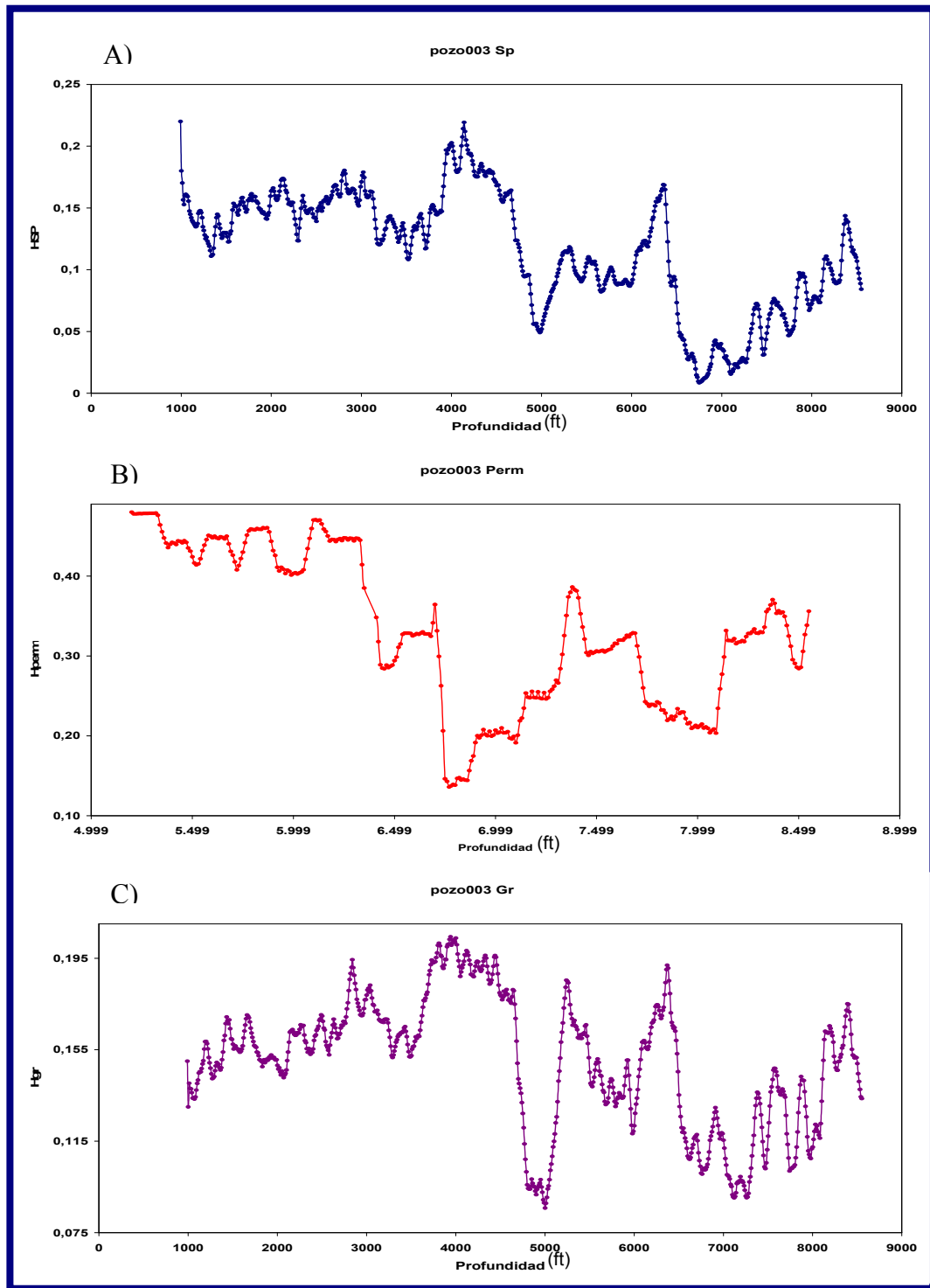


Figura 6.2. Gráficos de H vs. Profundidad del Pozo003: A) curva de H del registro Potencial Espontáneo, B) curva de H del registro de Permeabilidad y C) curva de H del registro de Rayos Gamma.

Pozo024

El Pozo024 al igual que el pozo anterior presenta los 3 registros objetos de este análisis como se observa en la Figura 6.3.

El análisis del registro de Potencial espontáneo se realizó en una profundidad de 909,5' a 8641,5'. En la sección A de la gráfica 6,4 se observa que H varía entre 0,20 y 0,09.

La profundidad a la cual se analizó el registro de Permeabilidad fue de 7100' a 8100', el Exponente de Hurst varía entre 0,47 y 0,17. (Figura. 6.4 B)

El registro de Rayos Gamma fue analizado desde los 7170' hasta los 8619', H varía entre 0,20 y 0,09. (Figura. 6.4 C). En las tres curvas se observa de nuevo un comportamiento antipersistente.

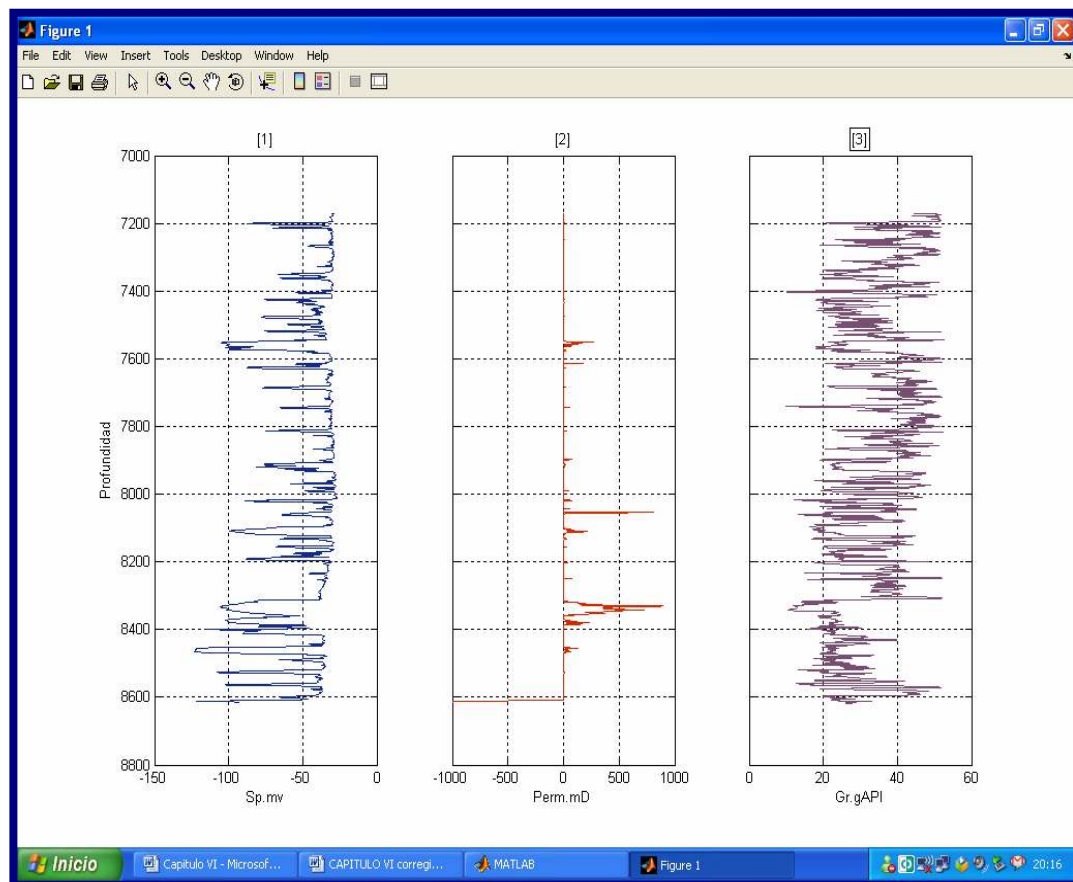


Figura 6.3. Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo024: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma.

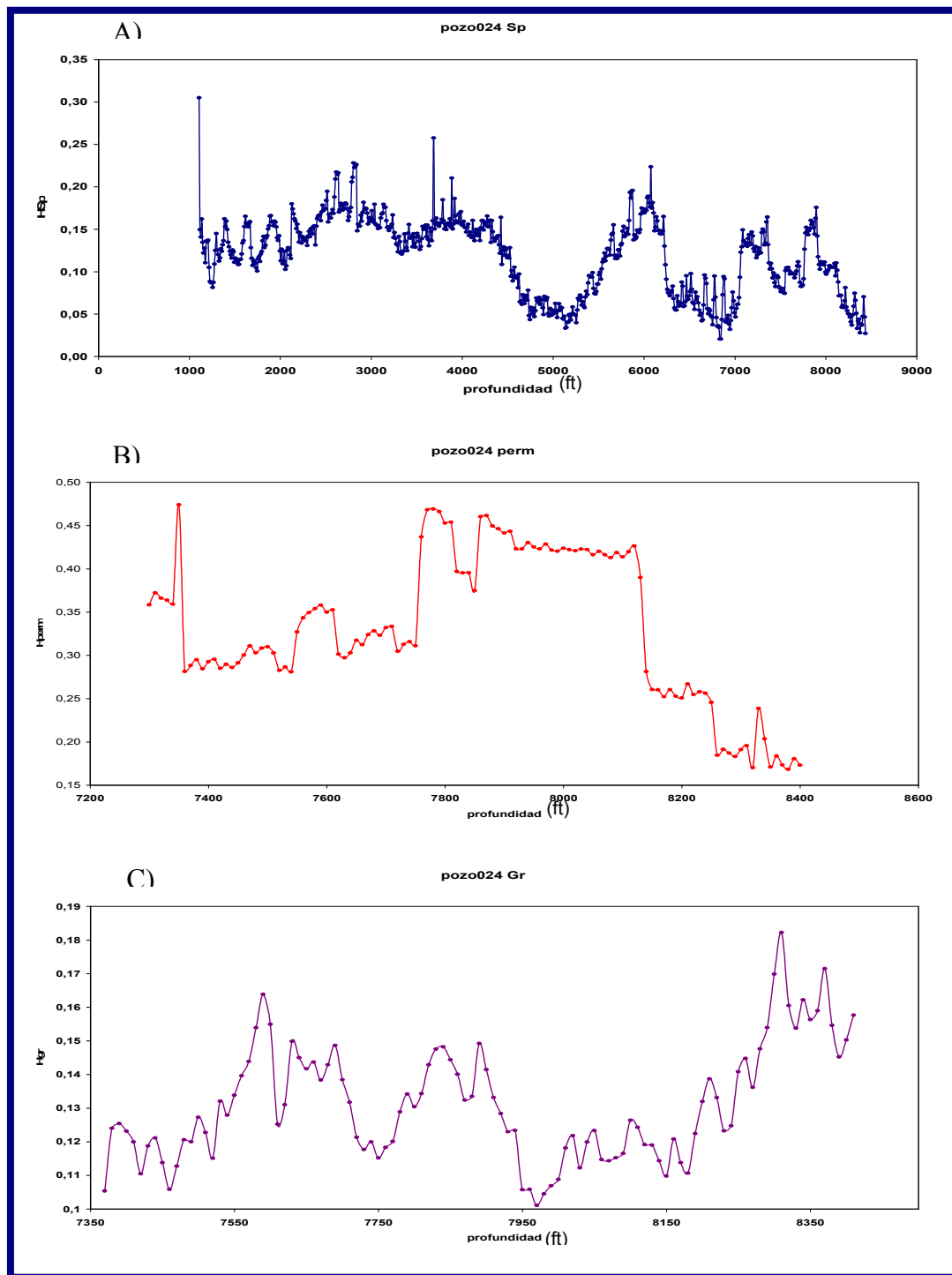


Figura 6.4. Gráficos de H vs. Profundidad del Pozo024: A) curva de H del registro Potencial Espontáneo, B) curva de H del registro de Permeabilidad y C) curva de H del registro de Rayos Gamma.

Pozo059

Este pozo consta de tres registros: Potencial Espontáneo, Permeabilidad y Rayos Gamma, en la Figura 6.5 se observa el despliegue de dichos registros.

El análisis del registro de Potencial espontáneo se realizó en una profundidad de 920' a 8947'. En la sección A de la grafica 6.6 se observa que H varía entre 0,21 y 0,03.

La profundidad a la cual se analizó el registro de Permeabilidad fue de 920' a 8946', el Exponente de Hurst varía entre 0,29 y 0,08. (Figura. 6.6 B)

El registro de Rayos Gamma fue analizado desde los 920' hasta los 8930', H varía entre 0,237 y 0,04. (Figura. 6.6 C). Se observa el mismo comportamiento antipersistente de las curvas anteriores.

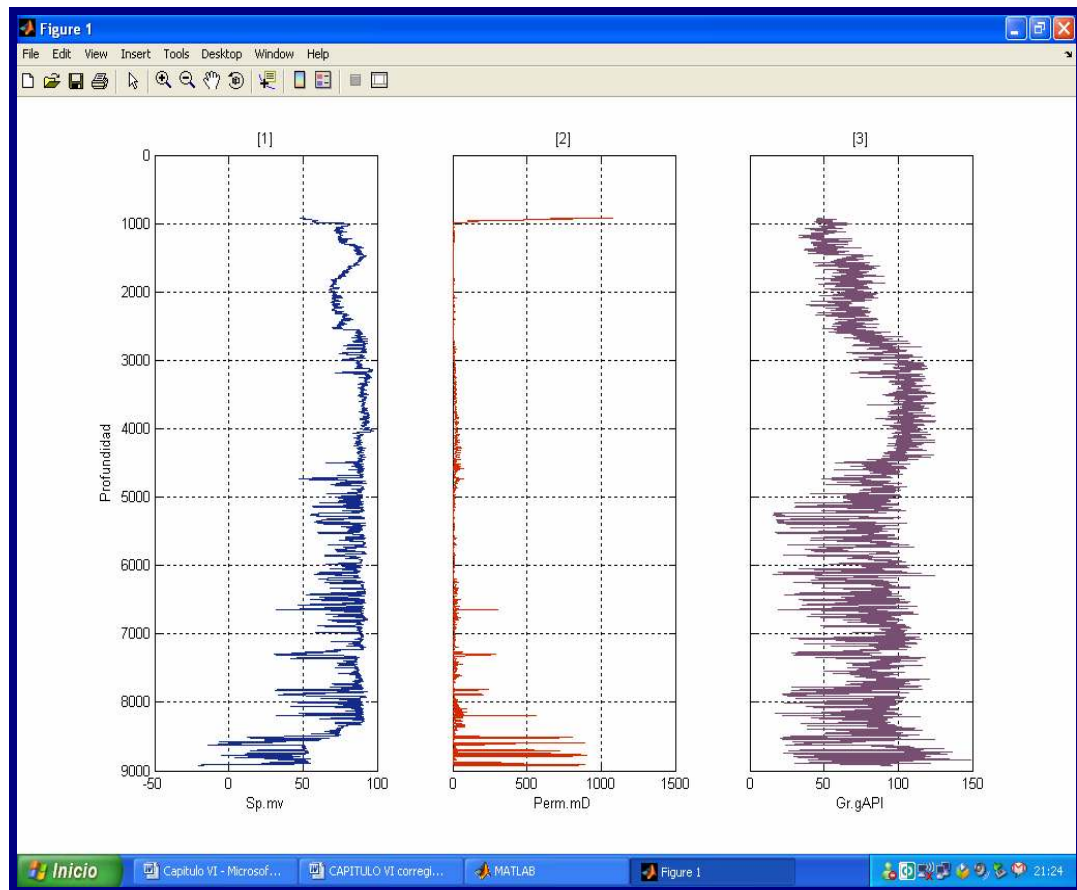


Figura. 6.5. Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo059: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma.

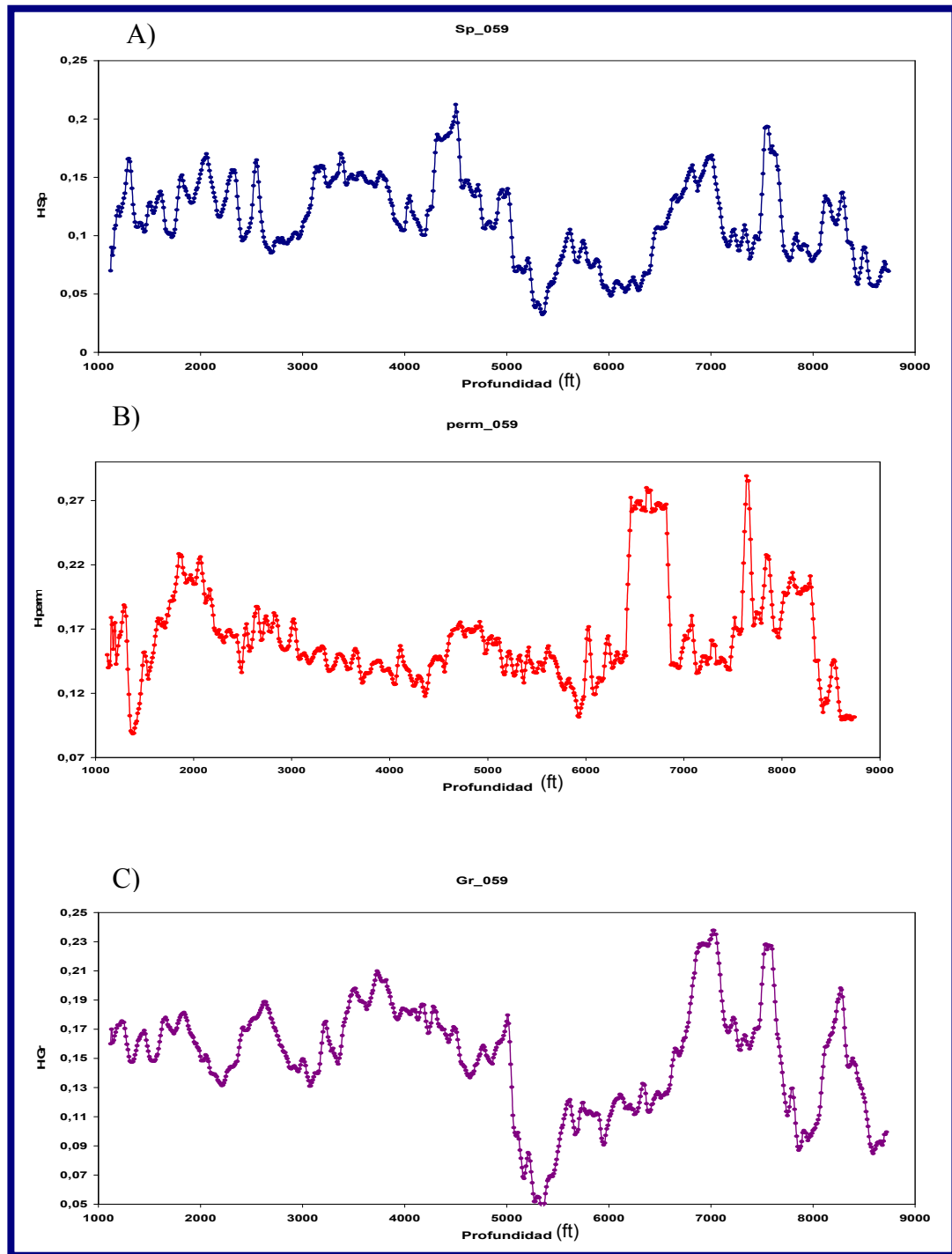


Figura. 6.6. Gráficos de H vs. Profundidad del Pozo059: A) curva de H del registro Potencial Espontáneo, B) curva de H del registro de Permeabilidad y C) curva de H del registro de Rayos Gamma.

Pozo099

El pozo099 al igual que el pozo anterior presenta los 3 registros objetos de este análisis como se observa en la Figura 6.7.

El análisis del registro de Potencial espontáneo se realizó en una profundidad de 828' a 8641,5'. En la sección A de la grafica 6.8 se observa que H varía entre 0,203 y 0,015.

La profundidad a la cual se analizó el registro de Permeabilidad fue de 6090' a 8830', el Exponente de Hurst varía entre 0,21 y 0,084. (Figura. 6.8 B).

El registro de Rayos Gamma fue analizado desde los 997' hasta los 8779', H varía entre 0,42 y 0,27. (Figura. 6.8 C). En las tres curvas se observa nuevamente un comportamiento antipersistente.

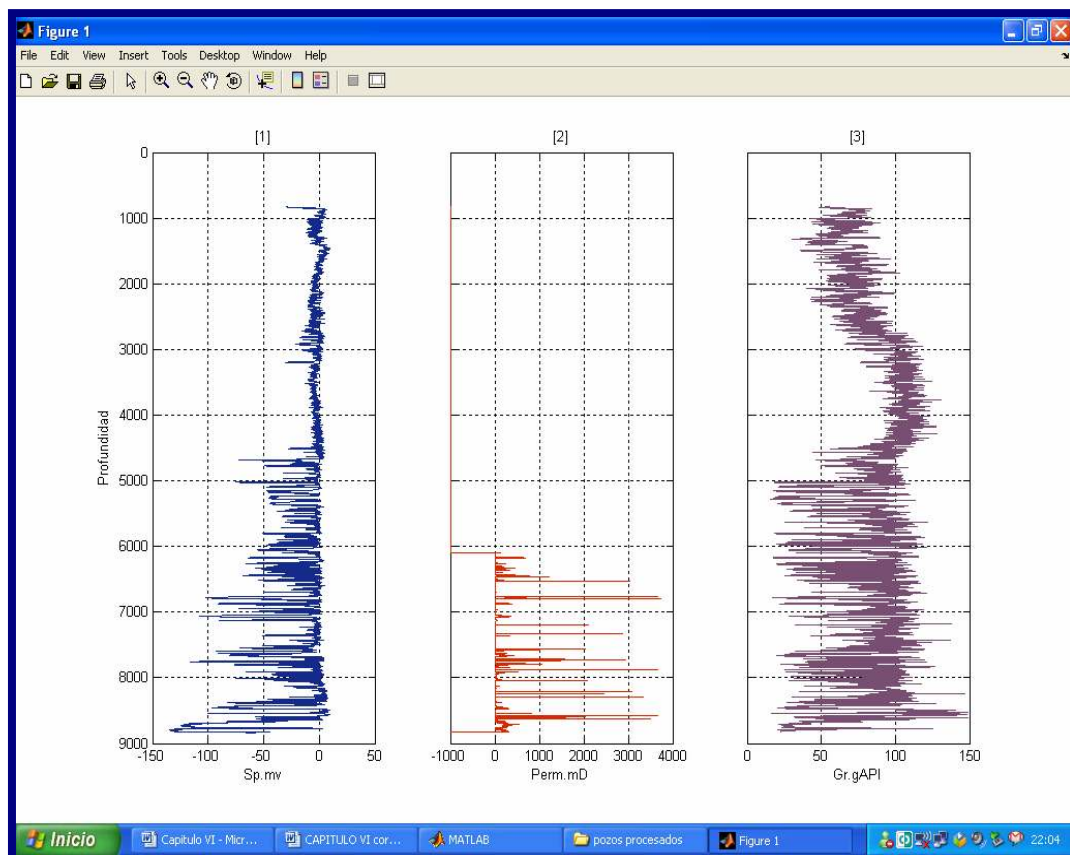


Figura. 6.7. Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo099: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma.

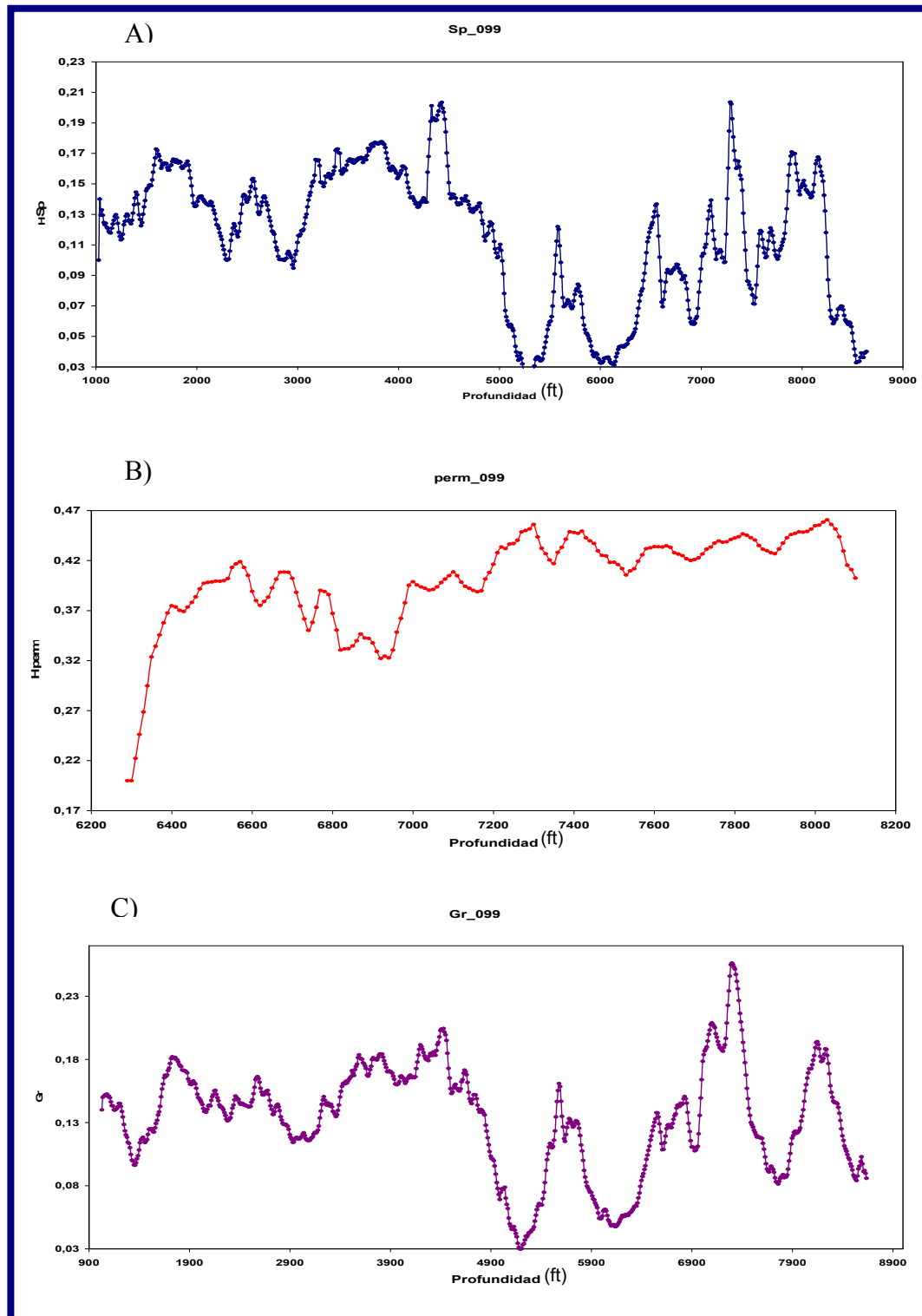


Figura 6.8. Gráficos de H vs. Profundidad del Pozo099: A) curva de H del registro Potencial Espontáneo, B) curva de H del registro de Permeabilidad y C) curva de H del registro de Rayos Gamma.

Pozo123

Este pozo consta de tres registros: Potencial Espontáneo, Permeabilidad y Rayos Gamma, en la Figura 6. 9 se observa el despliegue de dichos registros.

El análisis del registro de Potencial espontáneo se realizó en una profundidad de 845' a 9750'. En la sección A de la grafica 6.10 se observa que H varía entre 0,228 y 0,0024.

La profundidad a la cual se analizó el registro de Permeabilidad fue de 845' a 9754', el Exponente de Hurst varia entre 0,456 y 0,31. (Figura. 6.10 B).

El registro de Rayos Gamma fue analizado desde los 6449,5' hasta los 8470', H varía entre 0,218 y 0,085.(Figura. 6.10 C). Se mantiene el comportamiento antipersistente de las curvas anteriores.

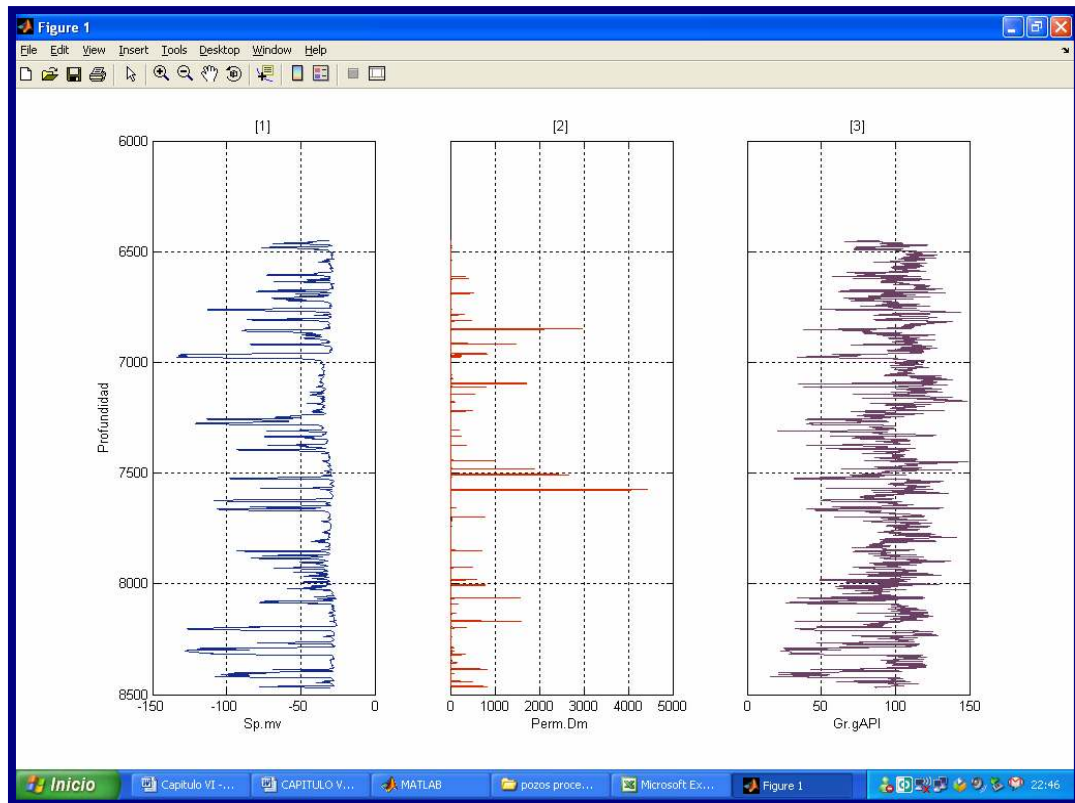


Figura 6.9. Despliegue de los tres registros presentes en el Pozo123: [1] Potencial Espontáneo, [2] Permeabilidad y [3] Rayos Gamma.

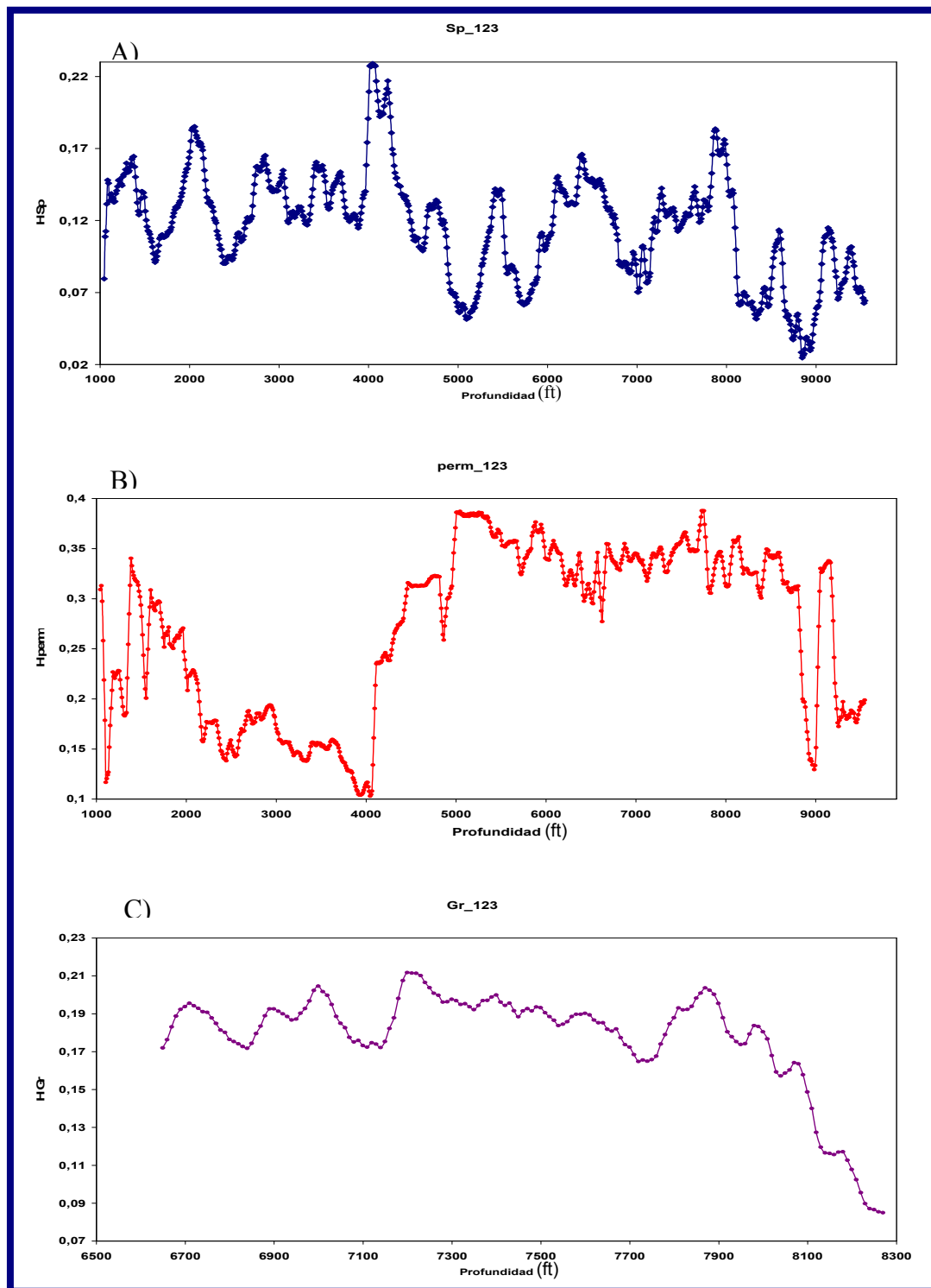


Figura 6.10. Gráficos de H vs. Profundidad del Pozo123: A) curva de H del registro Potencial Espontáneo, B) curva de H del registro de Permeabilidad y C) curva de H del registro de Rayos Gamma.

A continuación se muestra un mapa con la ubicación de los pozos descritos

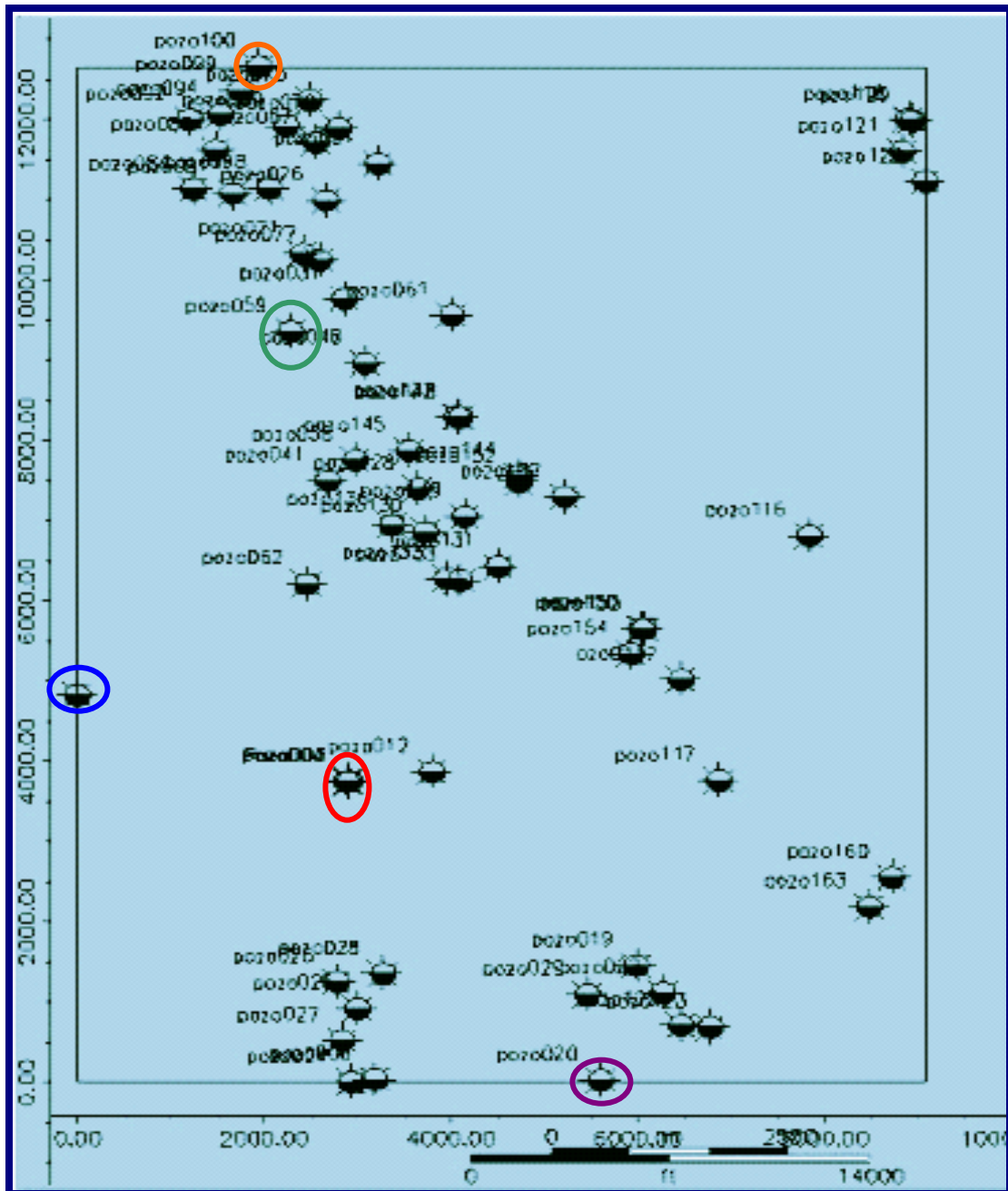


Figura 6.11. Mapa con la ubicación de los pozos. Los pozos presentados anteriormente se encuentran identificado con un ovalo un color distinto para cada pozo: Pozo003 rojo, Pozo024 azul, Pozo059 verde, Pozo099 anaranjado y por último el Pozo 123 en morado.

Los 79 pozos analizados presentaron comportamiento fractal con valores de H menores 0,5, lo cual indica que se está en presencia de un comportamiento antipersistente, es decir, una tendencia de aumento en el pasado implica una tendencia a disminuir en el futuro y viceversa, es decir, procesos de correlación negativa.

En las gráficas anteriormente descritas se puede observar que el valor del Exponente de Hurst " H " depende del parámetro petrofísico que se mida, debido a que se observan diferencias entre los valores de H según el registro analizado. Los registros de permeabilidad muestran los valores más altos del estudio con un H la mayoría de los casos por el orden de 0,3, mientras que los valores de H pertenecientes a los registros de Potencial Espontáneo y Rayos Gamma presentan valores más bajos de H . De igual forma existen variaciones en el comportamiento de H para un mismo tipo de registros en diferentes pozos.

En los resultados obtenidos se observa que las curvas de H obtenidas a partir de los registros de Permeabilidad (H_{perm}) no guardan relación con las curvas de H obtenidas a partir de los registros de Rayos Gamma (H_{gr}), en la figura 6.6 en sus secciones B) y C) se evidencia un comportamiento diferente de las curvas H_{perm} y H_{gr} , la primera curva mantiene un comportamiento con poca variación desde los 1000' a los 6500' aproximadamente, mientras que en este mismo intervalo de profundidad la segunda curva tiene comportamiento muy variante, presentando cambios brusco con descensos en los valores de H . Después de los 6500', aunque el comportamiento de curva H_{perm} presenta mayor variación que en el intervalo de profundidad anterior, estas variaciones no se corresponden a las presentadas en la curva H_{gr} . Los comportamientos descritos para cada una de las curvas B) y C) de la figura 6.6 son similares en el resto de las curvas obtenidas. Este comportamiento distinto de ambas curvas se debe a que el registro de permeabilidad refleja la Permeabilidad de la formación mientras que el registro de Rayos Gamma refleja litología.

Entre las curvas de H correspondientes a los registros de Potencial Espontáneo y Rayos Gamma se observa una estrecha relación con un comportamiento similar en ambas curvas, como se puede observar en la figura 6.6 en las secciones A) y C). En éstas es evidente que en presencia de un cambio brusco en el comportamiento de H_{gr} , este mismo cambio es observado en la curva de H_{sp} . Las disminuciones y los aumentos en estas curvas se encuentran a la misma profundidad. Este comportamiento similar se observó en todas las curvas de H obtenidas para los registros de Potencial Espontáneo y de Rayos Gamma. La relación entre las respuesta de H para los dos tipos de registros antes mencionado se debe a que ambos reflejan litología.

En todas las curvas de H de los registros de Potencial Espontáneo y Rayos Gamma se aprecia que entre los 900' y los 4900' aproximadamente, existe un comportamiento con una tendencia de aumento en los valores de H ; sin embargo, después de los 5000' el comportamiento varía, en este caso se observa una oscilación mayor que en el intervalo de profundidad anterior, lo que evidencia que puede existir una correlación de H con la estratigrafía o el tipo de ambiente depositacional.

Para determinar lo antes expuesto se procede a generar un volumen geoestadístico y correlacionarlo con los topes de las formaciones interpretados.

VI.1.2 Volumen Geostadístico del exponente de Hurst

En los últimos años varios autores como Schager en 1999 y Sadler en el 2003, han propuesto que factores básicos de las secuencias estratigráficas como lo son: las fluctuaciones del nivel del mar y la tasa de sedimentación poseen naturaleza fractal en el dominio del tiempo.

El volumen geoestadístico del exponente de Hurst, ofrece la posibilidad de una mejor visualización del comportamiento fractal del área de estudio, de esta forma, se hace posible correlacionar dicho comportamiento con la estratigrafía de la zona.

A continuación se presentan algunas de las imágenes que forman parte del volumen geoestadístico, sobre cada una de las imágenes, se podrán observar los respectivos registros de Rayos Gamma, cabe destacar que estas imágenes no están escaladas horizontalmente. También se presentan la ubicación de cada pozo en el área de estudio.

Pozo 153

La ubicación del Pozo153 se puede observar en la Figura 6.12, así como la dirección del “crossline” 252 asociado a la imagen del volumen Geoestadístico de Exponente de Hurst mostrado en la figura 6.13, se contó con la información de Base y Tope de La formación Oficina para el Pozo153. La base de la formación en esta ubicación es de 8588' aproximadamente, el tope se encuentra a una profundidad de 4920'.

En la figura 6.12 se indica el tope y base de la Formación Oficina y se destaca la ubicación de la Formaciones Freites y Merecure

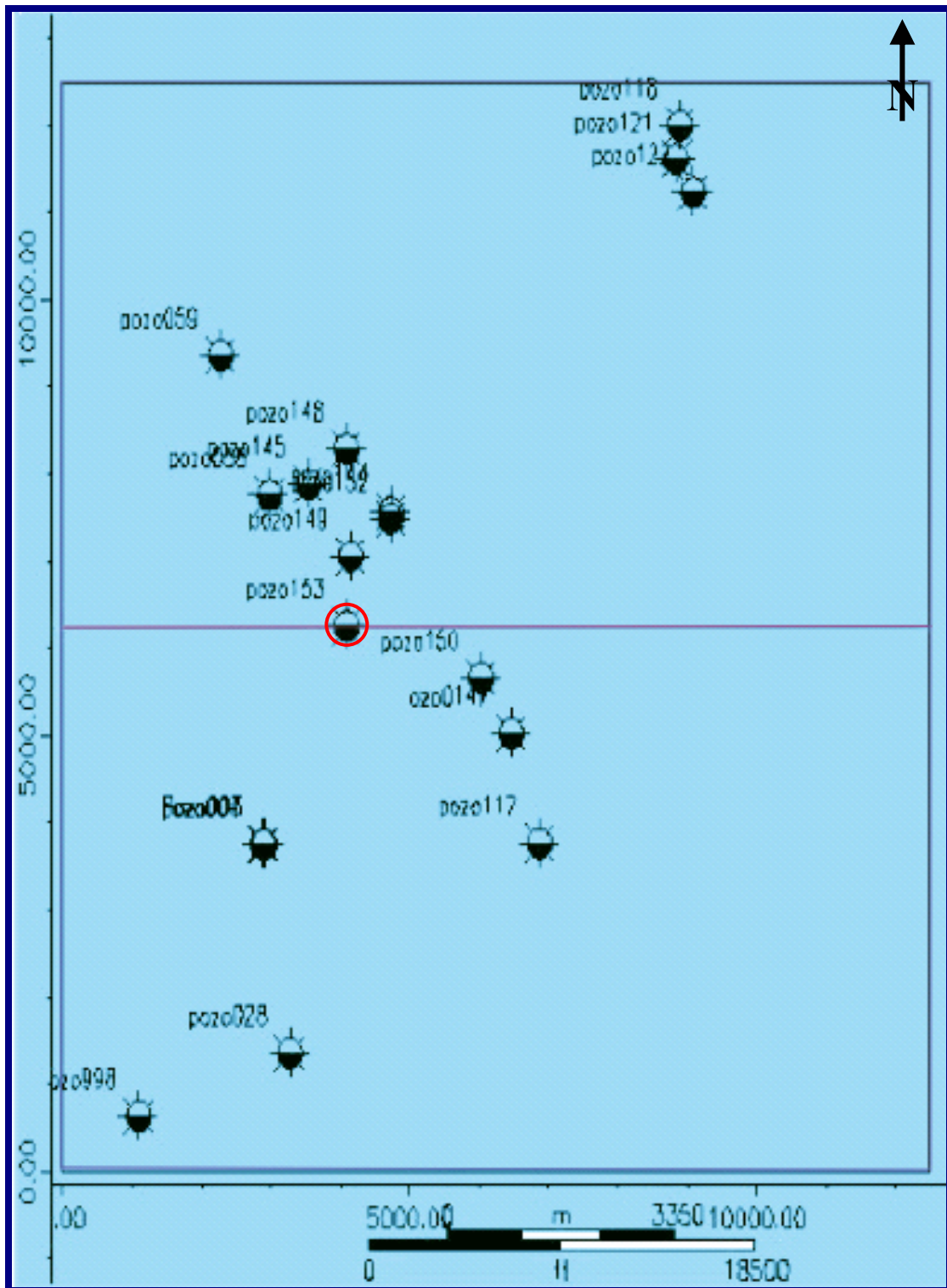


Figura.6.12 Mapa con la ubicación del Pozo153. La línea en color Morado Representa el "crossline" 252 del volumen geoestadístico. El Pozo153 se encuentra destacado con un círculo rojo

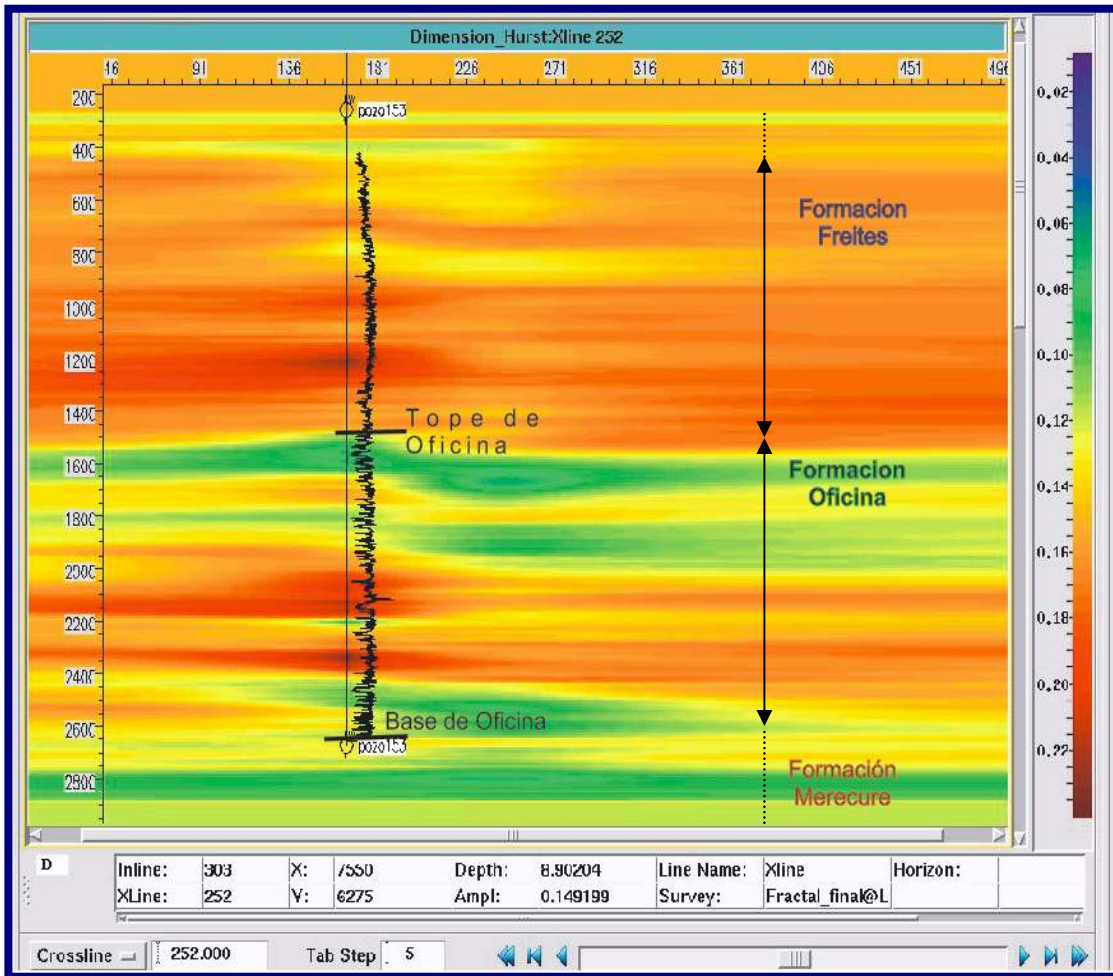


Figura 6.13 Imagen del Volumen geoestadístico del Exponente de Hurst asociado al crossline 252. En el volumen se observa el registro de Rayos Gamma del Pozo153, en líneas negras horizontales se muestra el Tope y la base de la Formación Oficina .El tope de Oficina coincide con un cambio en el valor del exponente de Hurst, se evidencia en el cambio de color de verde que representa un valor de H de 0.10 a anaranjado con un valor de H de 0.17. Este cambio en el valor de H es posible que se deba a diferentes ambientes de depositación.

Pozo 059

En el mapa de la figura 6.14, se muestra el Pozo059, la ubicación del “Crossline” 375 y el “Inline” 132 del volumen geoestadístico de Exponente de Hurst. Las Figuras 6.15 y 6.16 pertenecen al “Crossline” 375 y al “Inline” 132

respectivamente, en estas dos Figura se puede observar el registro de Rayos Gamma del Pozo059.

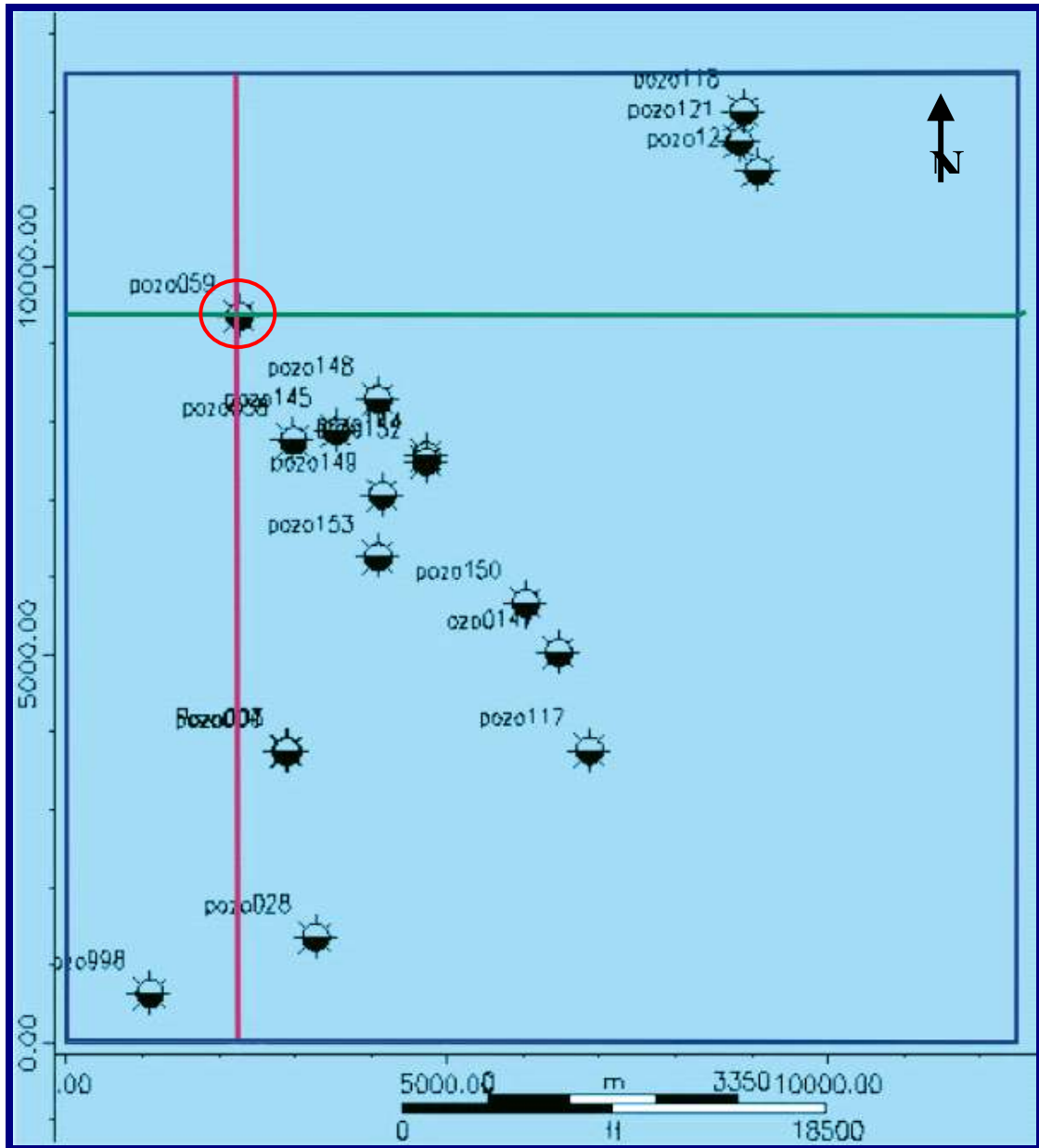


Figura.6.14 Mapa con la ubicación del Pozo059. La línea Fucsia representa la ubicación del “crossline” 375, la línea verde representa el “Inline”132. El Pozo059 se encuentra encerrado en un círculo rojo

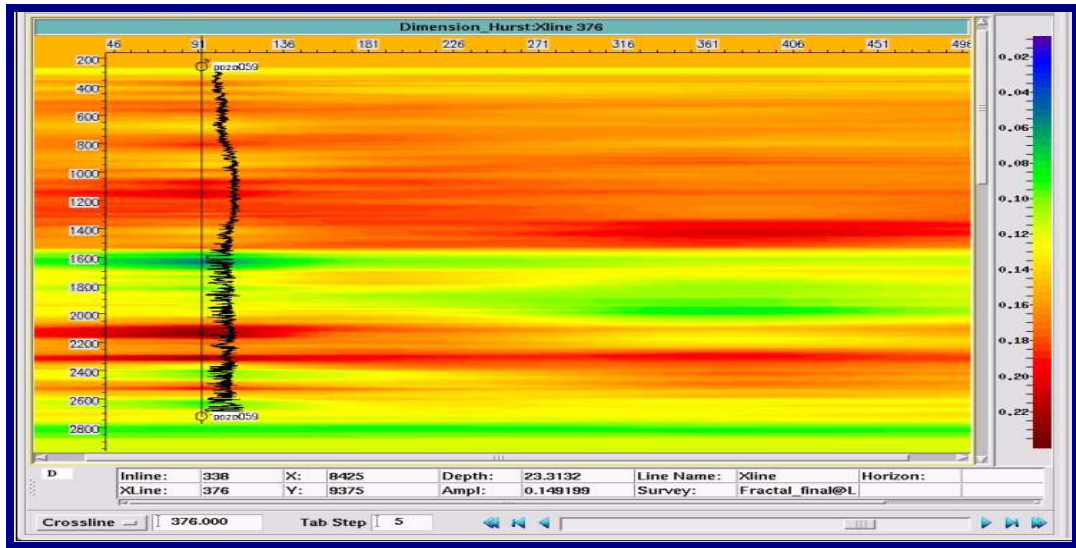


Figura 6.15 Imagen del Volumen geostatístico del Exponente de Hurts asociado al crossline 376. Se observa el registro de Gr perteneciente al Pozo059. De los 2628m a 1500m aproximadamente, se observa una alternancia de valores altos y bajos de H, mientras que en el intervalo de profundidad comprendido entre los 1500m a los 400m se aprecia un comportamiento más constante con pequeñas variaciones de H

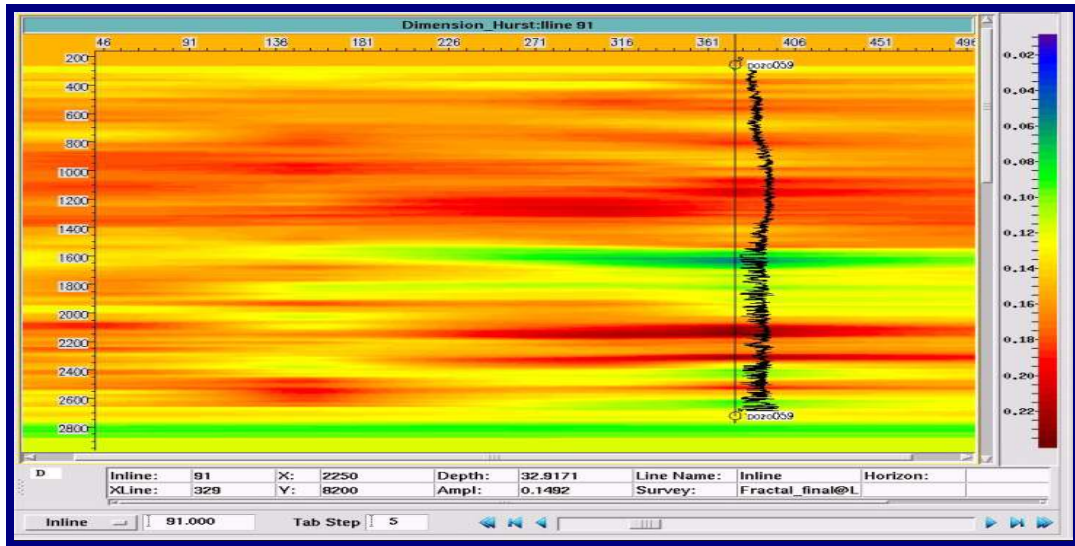


Figura 6.16 Imagen del Volumen geostatístico del Coeficiente de Hurts asociado al Inline 132. Se observa el registro de Gr perteneciente al Pozo 059. Al igual que en la imagen anterior se pueden apreciar dos intervalos de profundidad con características diferentes, manteniéndose el comportamiento de H descrito anteriormente. Estos dos intervalos posiblemente sean el contacto entre las Formaciones de Oficina y Freites..

Pozo 028

En el mapa de la figura 6.17, se muestra el Pozo028, y la ubicación del “Inline” 091. En la Figura 6,18 se observa la imagen del volumen geostadístico asociado al Inline 091.

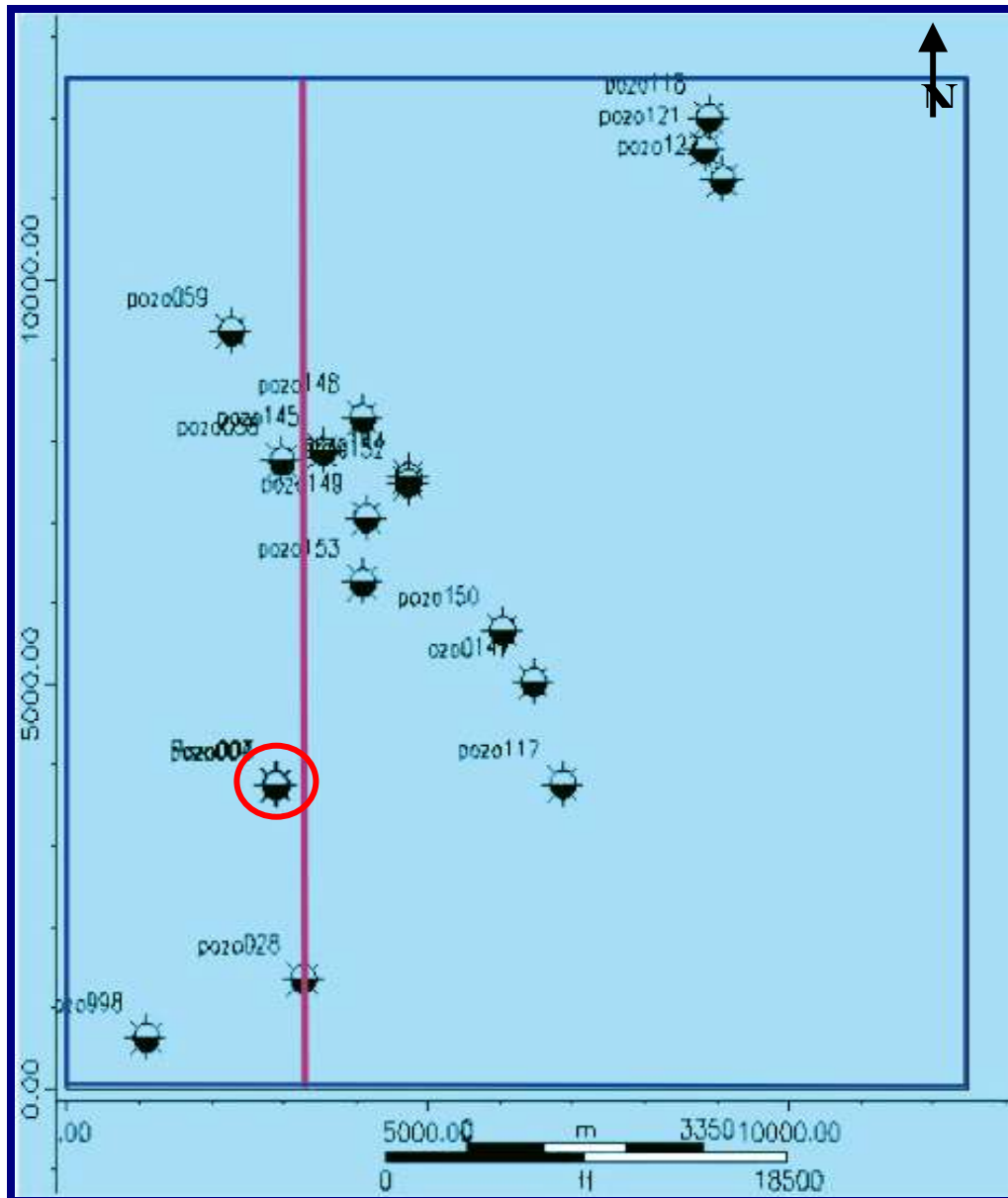


Figura.6.17 Mapa con la ubicación del Pozo028. La línea en color Fucsia Representa el “Inline” 252 del volumen geostadístico. El Pozo028 se encuentra destacado con un círculo rojo

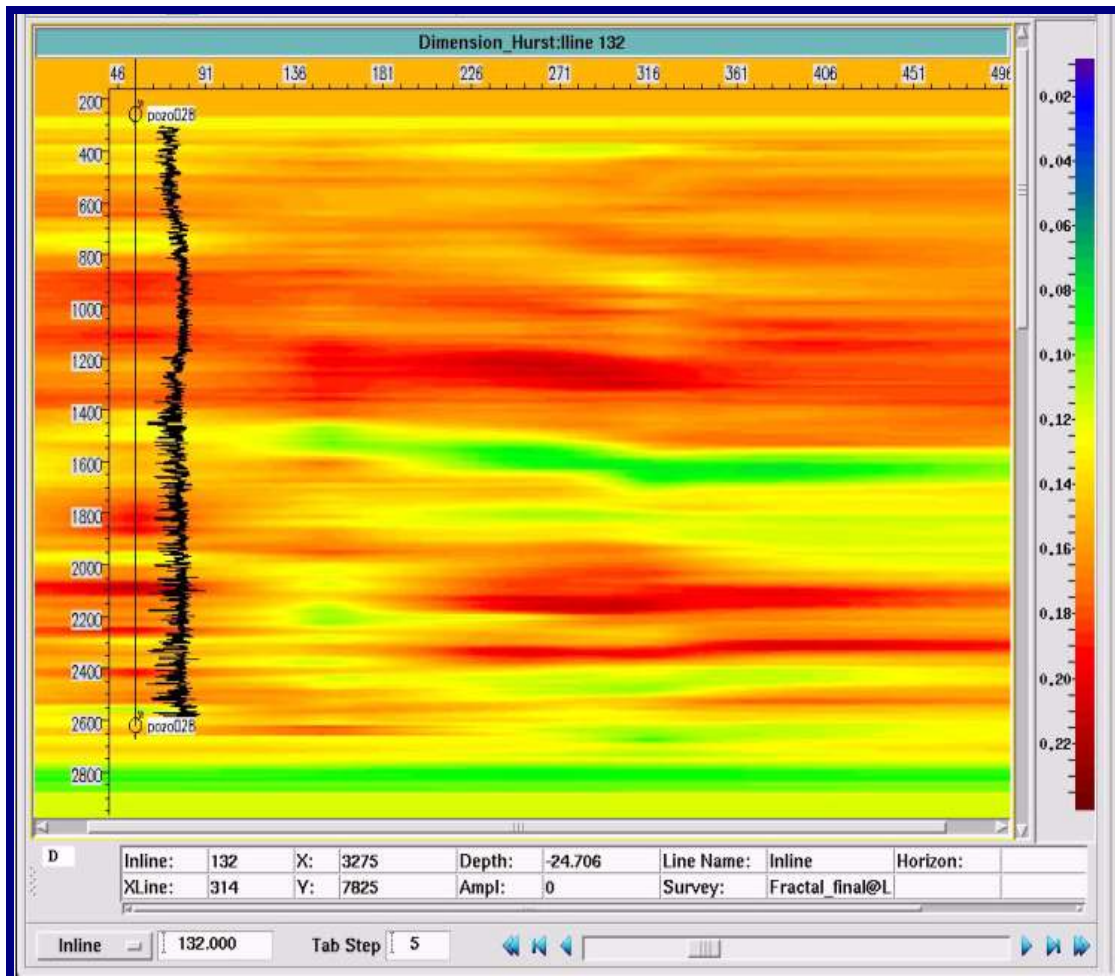


Figura 6.18 Imagen del Volumen geoestadístico del Coeficiente de Hurts asociado al Inline 132. Se observa el registro de Gr perteneciente al Pozo028. Nuevamente se observan dos intervalos aproximadamente en el mismo rango de profundidad que en las imágenes anteriores, 2618m-1500m para el primer intervalo y 1500m-400m para el segundo, estas dos zonas posiblemente correspondan con las Formaciones Oficina y Freites.

Las variaciones de las propiedades petrofísicas de los sedimentos son el resultado de las fluctuaciones del nivel del mar, la tasa de sedimentación y otros factores que para este estudio no interesan. En el Volumen geostadístico del Exponente de Hurst, calculado con base al registro de Rayos Gamma, se observan variaciones en el valor de H . Lamentablemente no se contaba con la interpretación de los horizontes pero en el volumen de H se observa claramente el posible contacto entre las Formaciones Freites y Oficina.

En todas las imágenes del volumen geostadístico se evidencian dos zonas con características marcadamente distintas. La primera comprende un rango aproximado entre los 1502m a 2617m (4930'-8588') de profundidad, en la que se observan alternancias repetidas de valores bajos y altos de H , variando entre 0.04 y 0.19. Una segunda zona que luce mucho más constante con variaciones más pequeñas, con H alrededor de 0.14 y 0.22 en un intervalo de profundidad entre los 400m y 2618m (1312' - 4930') aproximadamente. Estas dos zona podrían ser el reflejo de ambientes de depositación distintos entre si.

En todas las imágenes generadas del volumen geostadístico, se puede apreciar que alrededor de los 1500m (4930') de profundidad, se marca el contacto de las dos zonas ya descritas.

En el Pozo153 se contaba con la interpretación de base y tope de la Formación Oficina (base: 2618m y tope: 1500m), como se puede observar en la figura 6.13 el tope interpretado en el registro de Rayos Gamma coincide en profundidad con el contacto de las dos zonas observadas en el volumen, por lo cual el cambio observado en el comportamiento de H a esta profundidad puede deberse al contacto entre las formaciones Oficina y Frites.

Como ya hemos dicho, el primer intervalo comprendido entre los 2618m y 1500m aproximados de profundidad y basándonos en la información disponible del tope interpretado, el mismo corresponde a la Formación Oficina, en éste, se observan alternancias de valores altos y bajos de H lo que podría estar relacionado con el proceso de sedimentación de dicha formación. Es conveniente recordar que la Formación Oficina representa alternancias repetidas de los ambientes marinos de

agua bajas, marinos salobre y deltaico superior, por tanto, la oscilación que presenta H es un reflejo de los procesos eustáticos que se llevaron a cabo en este tiempo geológico, donde los mares avanzaron y se retiraron alternativamente.

En el intervalo que asocia a la Formación Oficina, también se evidencian variaciones laterales de los valores H , lo que estaría relacionado con los ambientes sedimentarios más complejos.

El segundo intervalo descrito en el volumen, corresponde a la Formación Freites. El comportamiento más constante, con menor variación de los valores de H , es un reflejo de los ambiente de sedimentación menos cambiante. Cabe destacar que la formación Freites se caracteriza por un ambiente marino somero en su parte inferior pasando a ambientes de aguas un poco mas profundas, lo que se correlaciona con el comportamiento de H en esta zona.

Lo observado en los volúmenes geoestadísticos corrobora lo apreciado en las curvas de obtenidas a partir del registros de Rayos Gamma, donde se evidenciaba, alrededor de los 1500mde profundidad (4920'), un posible cambio en la estratigrafía o en el ambiente de sedimentación en el área de estudio.

Del análisis realizado se puede inferir que los valores pequeños de H (0.049) corresponden a ambientes deltaicos o, a procesos eustáticos de regresión, mientras que los valores altos de H (0.22) corresponderían a ambientes marinos someros o bien, a procesos eustáticos de progradación. De esta forma, el rango de H entre 0.04 y 0.22 representarían a los ambientes de transición de un ambiente deltaico a uno marino somero.

Para una mejor visualización del posible contacto entre las formaciones Oficina y Freites, así como también de los procesos eustáticos relacionados a los ambientes de depositación, se generó a partir del volumen geoestadístico, imágenes horizontales desde los 1570 m. a 1430 m. de profundidad. Las imágenes son mostradas en una secuencia ascendente desde el Mioceno Temprano (Formación Oficina), hasta el Mioceno Medio (Formación Freites), con la finalidad de correlacionar dichas imágenes con los procesos de sedimentación.

A continuación se presentan una secuencia de imágenes horizontales, generadas a partir del volumen geoestadístico, donde se va desde el Mioceno Temprano al Mioceno Medio en un intervalo de profundidad de 1570 m. a 1430 m.

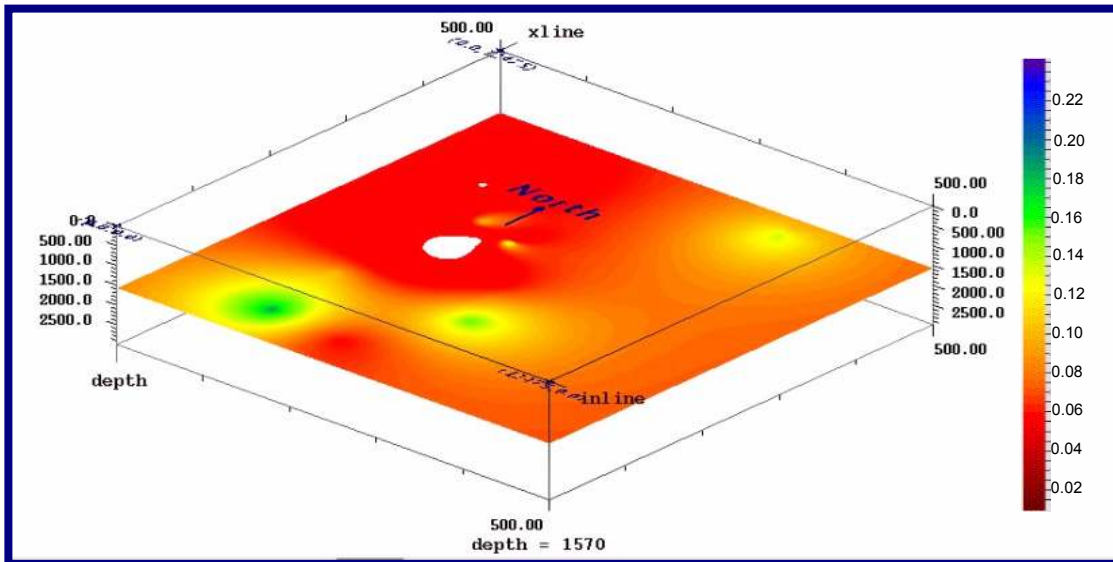


Figura. 6.19 Imagen para una profundidad de 1570 del volumen geoestadístico. A esta profundidad la imagen presenta valores de H comprendidos entre 0,02 en la parte norte de la imagen, al sur H se incrementa llegando en algunos casos a 0,16. Esta imagen representa el inicio de la transición de la Formación Oficina a la Formación Freites, en ella se observa un ambiente predominantemente deltaico.

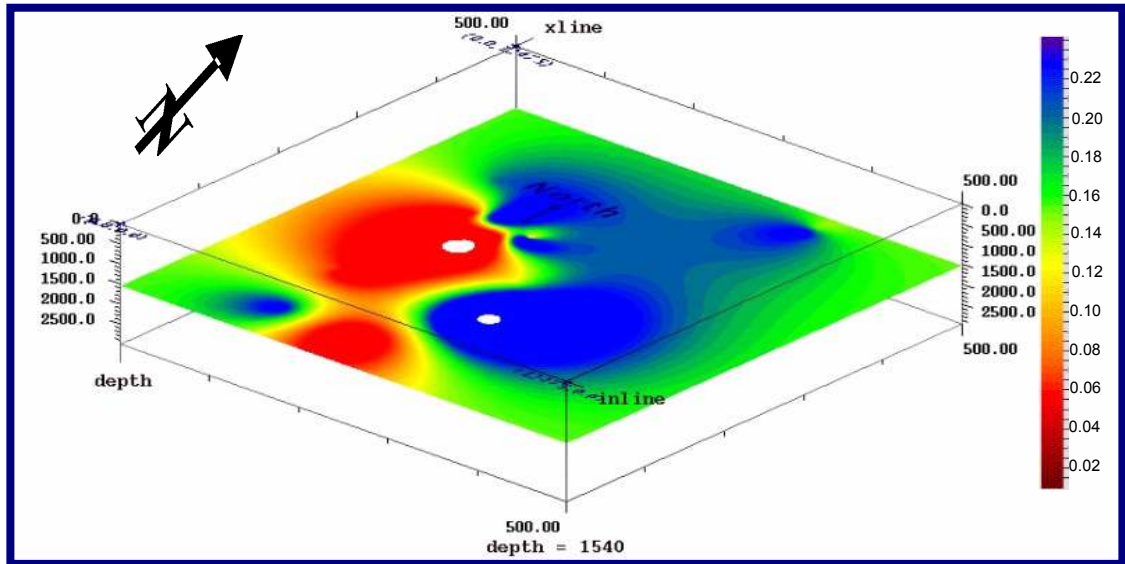


Figura. 6.20 Imagen para una profundidad de 1540m del volumen geostadístico. Desplazándonos 30m en dirección ascendente. En esta imagen se comienza a observar valores de H entre 0.19 y 0.22 representados con los colores azules y verdes, lo que refleja como el nivel va subiendo en dirección nor-este. La nor-este que antes estaba ocupada por un ambiente deltaico, a hora la vemos con una transición de deltaico a Mario somero.

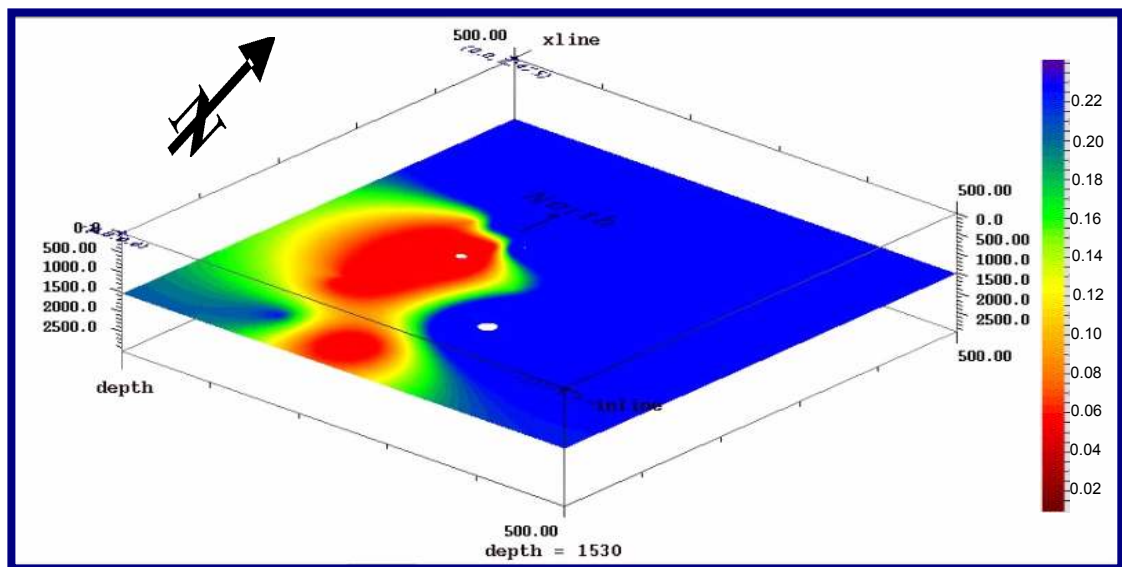


Figura. 6.21 Imagen para una profundidad de 1530m del volumen geostadístico. Se acentúa el comportamiento observado en la imagen anterior. Es evidente como en la dirección norte-este los valores altos de H , que parecen estar relacionados con un ambiente marino somero, van desplazando los valores más bajos de H . Se mantiene el proceso eustático de incremento en el nivel de mar.

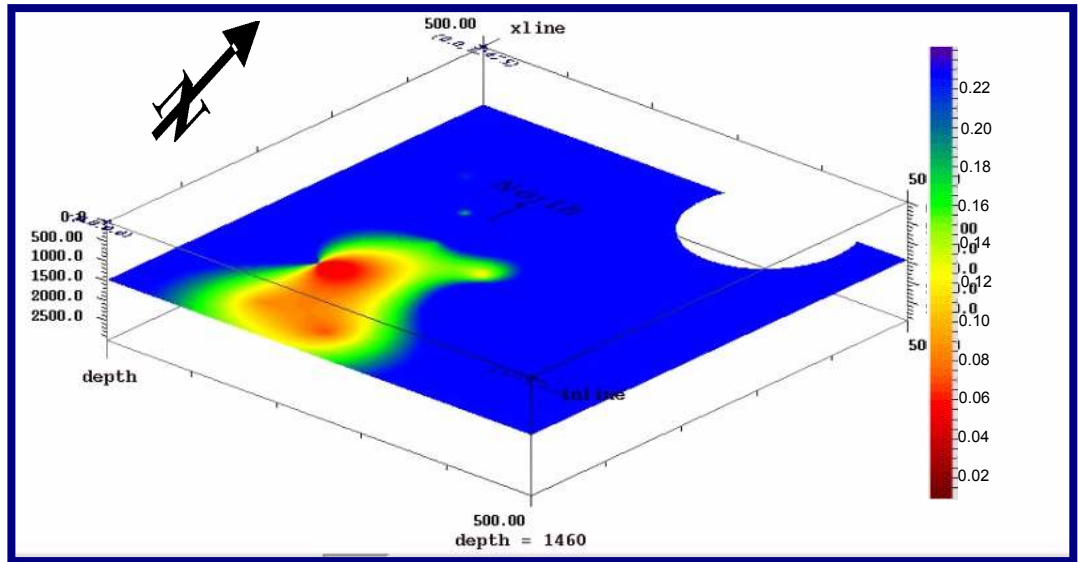


Figura. 6.22 Imagen para una profundidad de 1460m del volumen geoestadístico. Se mantiene el comportamiento observado en las imágenes anteriores. A los 1460m prácticamente se ha completado el proceso de transición entre un ambiente deltaico y un ambiente marino costero, en este caso la Formación Freites ya ocupa mas espacio en la imagen que la formación Oficina. Se sigue observando la subida del nivel del mar.

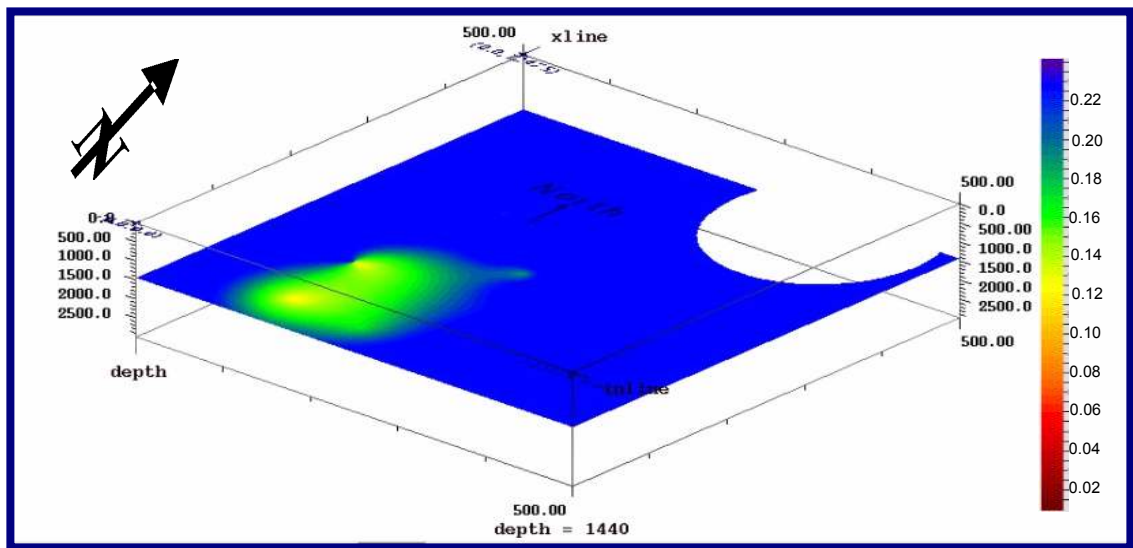


Figura.6.23 Imagen para una profundidad de 1440' del volumen geoestadístico. Se hace cada vez mas evidente la presencia de un ambiente marino con valores de H alrededor de los 0.22 en casi la totalidad de la imagen lo que se corresponde a la formación Freites.

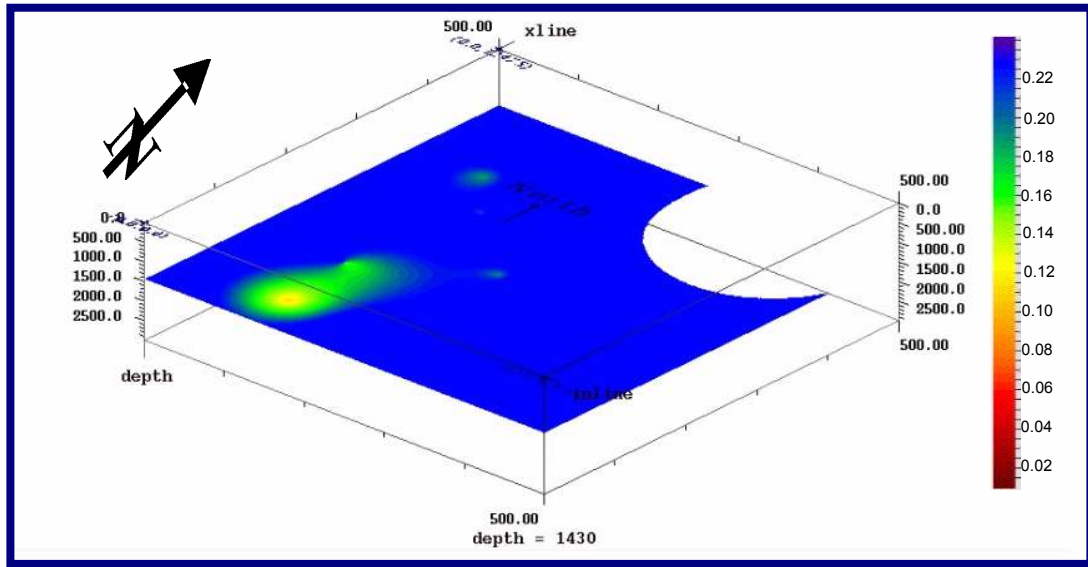


Figura.6.24 Imagen para una profundidad de 1430m del volumen geoestadístico. En esta imagen se esta en presencia exclusivamente de la formación Freites, a esta profundidad solo se evidencia un ambiente marino con valores de H alrededor de 0.22.

En la secuencia de imágenes mostradas (desde la Figura 6.19 a la Figura 6.24), se corrobora la transición de un ambiente de sedimentación deltaico a uno marino de somero, donde el color azul se relaciona con el ambiente marino y el color anaranjado oscuro representa el ambiente deltaico, la degradación de colores entre el azul y anaranjado oscuro se relaciona con la transición entre los ambiente ya mencionados.

La Figura 6.19 luce bastante uniforme en cuanto a los valores de H , estos se encuentran, en su mayoría alrededor de 0.04 y 0.06 con algunas pequeñas zonas donde el valor de H va aumentando hasta llegar a 0.16 aproximadamente. Es de hacer notar que a esta profundidad (1570m), se está en presencia del tope de la Formación Oficina, el mismo esta caracterizado por un ambiente deltaico progradante, lo que se relaciona bastante bien con lo observado en la imagen y corrobora una posible relación entre los valores bajos de H y ambientes deltaicos, en esta zona de la Cuenca Oriental de Venezuela. De la misma forma, es posible que exista relación entre los cambios laterales característicos de un ambiente deltaico progradante con los aumentos localizados del valor de H que se observan en la Figura 6.19.

A medida se alcanzan los 1500 m. profundidad a la cual en la Figura 6.13 se ubica el tope la Formación Oficina, en las Figuras 6.20 y 6.21 se observa como el valor de H va aumentando en sentido norte-sur, lo que se relaciona directamente con la dirección del aporte sedimentario. La transición de un ambiente deltaico a un ambiente marino queda evidenciada en el cambio del anaranjado oscuro al azul, pasando por valores de H intermedios, lo que representaría la transición de la Formación Oficina a la Formación Freites.

En las 3 últimas figuras (6.22; 6.23 y 6.24) de la secuencia de imágenes horizontales generadas a partir del volumen geoestadístico, se puede apreciar como se inicia el proceso de sedimentación de la Formación Freites. Se evidencia un ascenso del nivel del mar en dirección norte-sur, a medida que nos desplazamos desde una profundidad mayor a una menor se observa como la presencia del ambiente deltaico disminuye y como consecuencia la Formación Oficina va desapareciendo.

Lo antes expuesto se evidencia en la figura 6.22 el incremento de los valores de H en dirección norte-sur, permaneciendo un área con valores de H que disminuyen desde 0.22 a 0.06 aproximadamente localizado en la zona sur de la imagen, ésta disminución de H se puede relacionar con la presencia de la Formación Oficina y en consecuencia con un ambiente deltaico progradante, mientras que el resto de la imagen presenta valores constante de H alrededor de 0.22, corroborando la relación de estos valores con un ambiente marino costero.

En las Figuras 6.23 y 6.24 que corresponde respectivamente a los 1440m y 1430m de profundidad se mantienen los valores de H por el orden de 0.22, y la presencia de valores bajos de H sigue disminuyendo, dando paso a un completo ambiente marino somero en la zona.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A largo del trabajo se dedujeron las siguientes conclusiones así como también las recomendaciones pertinentes:

- El análisis de Rango Re-Escalado creado por Hurst constituye un método viable para la determinación del comportamiento fractal de las propiedades medidas por los registros de Potencial Espontáneo, Rayos Gamma y de Permeabilidad.
- Los registros Potencial Espontáneo, Permeabilidad y Rayos Gamma, presentaron una tendencia lineal en los gráficos de $\log R/S$ vs $\log N/2$ por tanto poseen un comportamiento fractal.
- Los registros Rayos Gamma y Permeabilidad no exhiben el mismo patrón en el exponente de Hurst debido a que los primeros reflejan litología y los segundos la permeabilidad de la formación.
- Los registros de Rayos Gamma y Potencial Espontáneo poseen correlación en el exponente Hurst motivados a que ambos se relacionan con la litología a pesar de que los procesos de medición son distintos.
- Todos los pozos analizados exhibieron un comportamiento de H antipersistente ($H < 0.5$). Lo que indica la presencia de procesos de sedimentación complejos. En estos procesos antipersistentes los eventos de un determinado momento no tienen ninguna relación con los eventos del pasado.
- La utilización del volumen geostadístico de H generado mediante los Registro de Rayos Gamma brinda una herramienta para correlacionar los valores de H con la estratigrafía, debido a que es posible una mejor visualización lateral del comportamiento de H .
- En el caso particular de la Cuenca Oriental de Venezuela para las Formación Oficina, el registro de rayos Gamma responde a un patrón fractal, cuyo exponente de Hurst varía entre 0.22 a 0.24 el cual se relaciona con un

ambiente marino somero. Los valores de H de 0.6 son relacionados con un ambiente deltaico.

- En el caso particular de la Cuenca Oriental de Venezuela para la Formación Freites, el registro de rayos Gamma responde a un patrón fractal, cuyo exponente de Hurst varía entre los valores que van desde 0.22 a 0.24 el cual se relaciona con un ambiente marino somero.
- Ambientes marinos poseen valores de exponente Hurst entre 0.16 y 0.22
- Ambientes deltaicos, llanuras de inundación, canales y pantanosos poseen valores de exponente de Hurst entre 0.06 y 0.16.
- El volumen geoestadístico mostró un aporte sedimentario de Sur a Norte entre los contactos de Oficina y Freites, lo que corrobora la relación implícita del exponente de Hurst con las secuencias de sedimentación.

Al concluir con este trabajo se siguieren las siguientes recomendaciones:

- Continuar este estudio integrando volúmenes sísmicos, interpretaciones estructurales y análisis de estratigrafía por secuencia, con identificación y correlación de cuerpos sedimentarios que posean características petrofísicas y geológicas, necesarias para convertirse en objetivos económicamente rentables en la industria petrolera.
- Extender el estudio a los diferentes registros de pozos disponibles en la industria petrolera.
- Realizar este estudio en las distintas cuencas petrolíferas de Venezuela con la finalidad de verificar los valores de exponente de Hurst y/o verificar la consistencia de los valores hallados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Arguello, Gustavo (2005). Diseño e implementación de un algoritmo con base fractal para realizar para realizar análisis de rango re-escalado en registros de pozos. Universidad Simón Bolívar. Disponible: <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb.htm> [consultado: 2007, febrero 15]
- Arizabalo, R y otros (2004). Fractal and cumulative trace analysis of wire-lines logs from a well in a naturally fractured limestone reservoir in the Gulf of Mexico . Geofísica Ineternacional, 43 (3): 467- 476
- Barton, C. y La Pointe, P. (1995) Fractals in petroleum geology and Herat processes. Plenum Press. New York and London. 317p.
- Dwight, N. (2000). Brownian motion and fluctuaction – dissipation theoren. Elegant Connections in Physisc, 9 (2): 18 – 22
- Feder, J (1988). Fractals. Plenum Press. New York. 281p.
- González de Juana, C., Iturralde, J. y Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Editorial Foninves. Caracas-Venezuela
- Gonzales, V. y Guerrero, C. (2001). Fractales: fundamentos y aplicaciones. Parte I: Concepción geométrica en la ciencia e ingeniería. Ingeniería. Ingeniería, IV (10):53 – 59
- Hewett, T. y Behrens , R. (1990). Conditional simulation of reservoir heterogeneity with fractals. SPE formation evaluation. 217- 224

- Iribarren, J. (2001). Movimiento Browniano fraccionario generalizado. Acta científica venezolana. 52 (2):19 – 20
- López, R. y otros (2005). Relationship between the fractal dimension anisotropy of the spatial faults distribution and the paleostress fields on a variscan granitic massif (central – Spain). The F – parameter. Journal of Estructural Geology. 27: 663-677. [Revista en Línea]. Disponible: <http://www.elsevier.com/locate/lsg>
- Mandelbrot y Wallis (1969). Computer experiments with fractional bgaussian noises. Parte I: sample graphs, averages and variaces. Water Resource. 5: 228-241
- Matamoros, D y otros (2000). Modelación de yacimientos naturalmente fracturados mediante geometría fractal. ESIME. 45-51
- Mendoza, J. (1998). Problemas de Escalamiento en el modelaje de rocas sedimentarias y sus posibles soluciones por medio del uso de geometrías fractales. Interciencias, 23 (6): 363-368
- Mendoza, V. (2005). Geología de Venezuela. Ciclo terciario superior o tardío. Tomo II, Universidad de Oriente. 185 – 232p.
- Modesto, R.(2003). Enfoque multifractal de registros geofísicos de pozos en las secciones de interés del occidente de Venezuela. Trabajo de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela
- Montes, V. (1993). Fractales y series de datos geofísico. Geofísic Coloma, (2): 9 – 12
- Moral, Francisco y Márquez, José (2002). Ejemplo de representación de gráfica de una variable regionalizada. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica.

Santander España. Disponible: <http://departamentosunican.es/ingegraf/cd> .
[Consulta: 2007, octubre 18]

Nápoles, J. (2003). Una introducción a la geometría fractal. Disponible:
<http://www.fractaltec.org>

PDVSA – CIED (2001). Curso de evaluación de formaciones

PDVSA (1999). Código estratigráfico de Venezuela: <http://www.pdvsa.com/lexico>

Restrepo, D. y otros (2001). Conjuntos fractales en el tiempo y en el espacio.

Sadler, P. (1999). The influence of hiatuses on sediment accumulation rates.
GeoResearch Forum. 5. Disponible: <http://earthscience.ucr.edu>. [Consulta:2007,
octubre 23]

Schlager, W.(2003). Fractal Nature of stratigraphic sequences. Earth and Life
Sciences.

Schlumberger (1997). WEC 1997 evaluación de pozos. Schlumberger. Surencó, C:A.
Caracas, Venezuela

Todoeschuck, J. y otros (1992). If geology is fractal, what do we do next?.
Geophysics: The leading edge of exploration. 29 – 35p

Turcotte, D.C.(1997). Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge
University Press. Cap. VII

Valdez, R. y Olivarez, E. (1998). Geometría fractal en la ciencia del suelo. Terra, 16
(3): 277-288