UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Análisis de sensibilidad de modelos de estratigrafía secuencial a los datos de yacimientos obtenidos por INTEVEP en el norte del Estado Monagas utilizando minería de datos

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Ingeniero Geólogo por el Bachiller Efraín Daubront

Caracas, Septiembre de 2011

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Análisis de sensibilidad de modelos de estratigrafía secuencial a los datos de yacimientos obtenidos por INTEVEP en el norte del Estado Monagas utilizando minería de datos

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Ingeniero Geólogo por el Bachiller Efraín Daubront

Tutor: Dr. Mauricio Bermúdez
Co-tutor: Msc. Mauricio Hernández

Caracas, Septiembre de 2011

Caracas, Noviembre de 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Efraín Daubront, titulado:

"Análisis de sensibilidad de modelos de estratigrafía secuencial a los datos de yacimientos obtenidos por INTEVEP en el norte del Estado Monagas utilizando minería de datos"

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

Prof. Pedro Alson
Jurado

Prof. Rafael Falcón
Jurado

Prof. Mauricio Bermúdez
Tutor Académico

Ing. Msc. Mauricio Hernández
Tutor Industrial

Tutor Académico: Dr. Mauricio Bermúdez. **Cotutor**: Msc. Mauricio Hernández.

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2011, 120 p.

Palabras claves: *minería de datos, estratigrafía por secuencia, análisis de sensibilidad, coeficientes de confiabilidad.*

Resumen

Esta investigación aplicaca un conjunto de técnicas para la extracción de conocimiento implícito en las bases de datos de los modelos de estratigrafía por secuencia del campo "El Furrial" pertenecientes a PDVSA-INTEVEP. Los fundamentos de dichas técnicas yacen en la inteligencia artificial, estadística y métodos numéricos que se engloban bajo el concepto de Minería de Datos. La zona de estudio es un subárea de aproximadamente 117 km^2 pertenecientes al campo "El Furrial", al norte del Estado Monagas, el cual constituye una de las mayores reservas de petróleo del país. Dada la importancia de la zona y lo útil que ha sido el empleo de los modelos de estratigrafía por secuencias para la prospección de hidrocarburos, se han propuesto numerosos modelos cualitativos que han sido revisados y validados en las últimas tres décadas. El objetivo de la presente investigación es evaluar su confiabilidad a través de información recopilada en las campañas de exploración (registro de pozos y cartas sedimentológicas) utilizando minería de datos con el propósito de analizar la sensibilidad del modelo desarrollado con dicha información.

Cronológicamente el presente trabajo se centra en el Cretácico, dado que en este Tiempo geológico se contaba con un margen pasivo, en el que el control estructural no afectó significativamente los patrones de depositación. Específicamente se estudió un sistema depositacional en alta (HST), en el que fueron identificados cinco marcadores arcillosos, los cuales correlacionan en varios pozos, de los cuales se tomaron cinco por contar con una distribución adecuada y una cantidad de datos suficientes. Empleando la minería de datos y métodos de visualización se identificaron los topes de lutita, luego se realizó un

análisis de sensibilidad con el propósito de estudiar el grado de dispersión entre el modelo original y las posiciones predichas por la metodología aquí propuesta. Se verificó que la profundidad arrojada por el procedimiento coincidiera efectivamente con los datos de núcleos mediante el empleo de cartas sedimentológicas, para con ello validar la efectividad del método.

En función del cambio en las posiciones originales y optimizadas de los estratos y analizando las diferencias entre ellas, se generó un mapa de sensibilidad. Para indicar la Confiabilidad del modelo original. Los resultados obtenidos muestran que la metodología aquí propuesta arroja resultados robustos concordantes con las observaciones geológicas.

Índice

I. INTRODUCCION 9

I.1. OBJETIVOS 12

I.1.1. Objetivo General 12

I.1.2. Objetivos Específicos: 12

I.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO 12

II. ANTECEDENTES 13

II.1. ANTECEDENTES SOBRE ESTUDIOS DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS. 13

II.2. ANTECEDENTES SOBRE MINERÍA DE DATOS APLICADA A LAS CIENCIAS DE LA TIERRA Y ALGUNOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE ESTRATIGRAFÍA CUANTITATIVA 15

III. GEOLOGÍA DEL NORTE DE MONAGAS 17

III.1. MARCO REGIONAL Y DESCRIPCIÓN TECTÓNICO-ESTRUCTURAL 17

III.1.1. Modelo estructural del área de estudio (V-9. PDVSA-INTEVEP, 2002) .. 19

III.2. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 20

III.2.1. Grupo Sucre 22

III.2.2. Grupo Guayuta: 24

III.2.3. Grupo Temblador: 26

III.3. BIOESTRATIGRAFÍA 29

III.4. PRINCIPALES PROBLEMAS DE LOS MODELOS ESTRATIGRÁFICOS Y SU ACOPLAMIENTO CON LOS MODELOS ESTRUCTURALES 29

III.5. MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS 29

III.5.1. Superficies convencionales de estratigrafía por secuencias y sus parasecuencias: 31

IV. MARCO TEÓRICO 33

IV.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIA 33

IV.1.1. Sistemas Depositacionales 39

IV.1.2. Superficies convencionales de estratigrafía por secuencias: 40

IV.1.3. Tipos de sistemas depositacionales: 41

IV.1.4. Tipos Generales de Superficies 43

IV.2. RESPUESTA ESPERADA EN LOS DIFERENTES REGISTROS DE POZOS 43

IV.2.1. Contador de rayos gamma 43

IV.2.2. Resistividad (ILM-ILD) 44
IV.2.3. Registros de conteo de neutrones (NPHI) 45
IV.2.4. Registros de densidad (RHOB) 45
IV.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS TOPES DE LUTITA POR MEDIO DE REGISTROS DE POZO 46
IV.3.1. Importancia de los topes de lutita como marcadores en secuencias estratigráficas 47
IV.4. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE MINERÍA DE DATOS 47
IV.4.1. Aplicación de la minería de datos como una técnica geoestadística 48
IV.5. PROGRAMACIÓN LINEAL Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 49
IV.5.1. Programación lineal 49
IV.5.2. Análisis de sensibilidad 50
IV.6. COMBINANDO MINERÍA DE DATOS, PROGRAMACIÓN LINEAL, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA PRODUCIR MODELOS ESTRATIGRÁFICOS CUANTITATIVOS 51
V. MARCO METODOLÓGICO 53
V.1. INVESTIGACIÓN PREVIA Y SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO 54
V.1.1. Identificación del patrón de correlación 55
V.1.2. Regla del Triángulo 56
V.2. CUANTIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE UNA BASE DE DATOS57
V.3. DATOS SINTÉTICOS 59
V.3.1. Diseño de un algoritmo para el cálculo de la confiabilidad del modelo 60
V.4. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS 60
V.4.1. Minería de datos y cálculo de confiabilidad 60
V.5. CÁLCULO DE CONFIABILIDAD DEL MODELO V-9 63
V.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 63
V.7. MAPA DE SENSIBILIDAD 65
VI. RESULTADOS 67
VI.1. INVESTIGACIÓN PREVIA Y SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO 67
VI.2. CUANTIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE UNA BASE DE DATOS68
VI.3. DATOS SINTÉTICOS 68
VI.4. COEFICIENTES APRENDIDOS POR MINERÍA DE DATOS 69
VI.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO 70
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS 81

VII.1. DEFINICIÓN EL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIA DE LA ZONA EN ESTUDIO. 81

VII.2. CUANTIFICACIÓN DEL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS MENCIONADO ANTERIORMENTE. 82

VII.3. COMPARACIÓN EL MODELO TEÓRICO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS CON EL MODELO NUMÉRICO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS, AMBOS DE LA ZONA EN ESTUDIO. 82

VII.4. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA SENSIBILIDAD DEL MODELO A TRAVÉS DE LAS TÉCNICAS DE MINERÍA DE DATOS Y GEOESTADÍSTICA 82

VII.5. ANÁLISIS DEL CÁLCULO DE CONFIABILIDAD 83

VII.6. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS A TRAVÉS DE LAS CARTAS SEDIMENTOLÓGICAS DE LOS NÚCLEOS DEL CAMPO EL FURRIAL. 86

VII.6.1. POZO P1 (Ver Anexos): 87

VII.6.2. Pozo P2 (Ver Anexos): 88

VII.6.3. Pozo P3 (Ver Anexos): 91

VII.7. MAPA DE SENSIBILIDAD 93

VII.7.1. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-D en el pozo P3 94

VII.7.2. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-B en el pozo P1 95

VII.7.3. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-E (FS4) en el pozo P1 96

VII.8. MAPA DE SENSIBILIDAD MODIFICADA POR PESO DE LA DIFERENCIA DE PROFUNDIDAD 97

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 99

VIII.1. CONCLUSIONES 99

VIII.2. RECOMENDACIONES 101

IX. BIBLIOGRAFÍA 102

X. ANEXOS 104

X.1. CODIGO FUENTE HECHO EN MATLAB 104

X.2. CARTAS SEDIMENTOLÓGICAS DISPONIBLES 130

Lista de Figuras

Figura 1. (a) Ubicación espacial (tomada del Informe V-9 PDVSA-INTEVEP, 2006), y (b) Ubicación cronológica tomada de Mendoza, 2005) 9
Figura 2. Marco estructural del área de estudio (Modificado de Patterson y Wilson, 1953; Young et al, 1956; González de Juana, 1980; Carnevalli, 1988; Subieta et al, 1988; CEPET, 1989 y Lander et al, 1990) 20
Figura 3. Grupo Temblador 26
Figura 4. Tabla de formaciones en el área de estudio (Tomado de Mendoza, 2005) 28
Figura 5. Modelo de secuencias estratigráficas del campo "El Furrial" del Informe: Revisión y validación del Modelo Estratigráfico a nivel del Cretácico. 30
Figura 6. Integración de disciplinas y datos en la estratigrafía por secuencias (Modificado de Catuneanu, 2006) 34
Figura 7. Cambios en el nivel eustático global del mar (Haq et al, 1988) 35
Figura 8. Superficies convencionales y sistemas depositacionales (Catuneanu, 2002) 38
Figura 9. Relación entre los sistemas depositacionales y la curva del nivel relativo del mar (Modificado de Catuneanu, 2006) 40
Figura 10. Contraste de los diferentes registros de pozo para un tope de lutita 47
Figura 11. Diagrama de Flujo de la metodología. En color verde las entradas de datos y en morado las salidas de resultados 53
Figura 12. Distribución en planta de los pozos empleados 55
Figura 13. Patrón de una lutita vista en un registro de pozos 56
Figura 14. Contraste de los picos y valles (Regla del Triángulo) 56
Figura 15. Cuantificación de la columna estratigráfica 57
Figura 16. Ejemplo de un registro cuantificado 58
Figura 17. Datos sintéticos para un estrato de lutita. La línea pespunteada vertical de color amarillo claro muestra el punto exacto donde debe pasar la superficie convencional (10012') 59
Figura 18. Contraste de los diferentes registros de pozo para un tope de lutita 61
Figura 19. Un Ejemplo de Análisis de sensibilidad: en azul el registro de rayos gamma, en rojo superpuesto el registro de resistividad para este pozo P5 64
Figura 20. Ejemplo de un mapa de sensibilidad. La posición de los picos corresponde con la de los pozos en UTM y su altura a la sensibilidad de una superficie dada 65
Figura 21. Modelo de Sensibilidad 66
Figura 22. Modelo de secuencias estratigráficas del campo "El Furrial" 67
Figura 23. Análisis de sensibilidad de los datos sintéticos 69
Figura 24. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P1 70
Figura 25. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P1 71
Figura 26. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P1 71
Figura 27. FS5 del Pozo P1 71
Figura 28. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P2 72
Figura 29. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P2 72
Figura 30. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P2 73
Figura 31. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P3 73
Figura 32. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P3 74
Figura 33. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P3 74
Figura 34. FS5 del Pozo P3 74

Figura 35. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P4 75
Figura 36. FS1 del Pozo P4 75
Figura 37. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P5 76
Figura 38. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P5 76
Figura 39. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P5 76
Figura 40. FS5 del Pozo P5 77
Figura 41. Sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias V-9 79
Figura 42. Mapa de sensibilidad y grado de confiabilidad 80
Figura 43. Comparación de sensibilidades por (A) por pozo y (B) por superficie 92
Figura 44. Análisis de sensibilidad en la superficie C3-D en pozo P3 94
Figura 45. Análisis de sincronización en la superficie C3-D en pozo P3 95
Figura 46. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-B en el pozo P1 95
Figura 47. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-E en el pozo P1 96
Figura 48. Mapa de sensibilidad aplicándole el peso de la diferencia de profundidad 97
Figura 49. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P1 130
Figura 50. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie B) 131
Figura 51. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie C) 132
Figura 52. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie D) 133
Figura 53. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P3 134

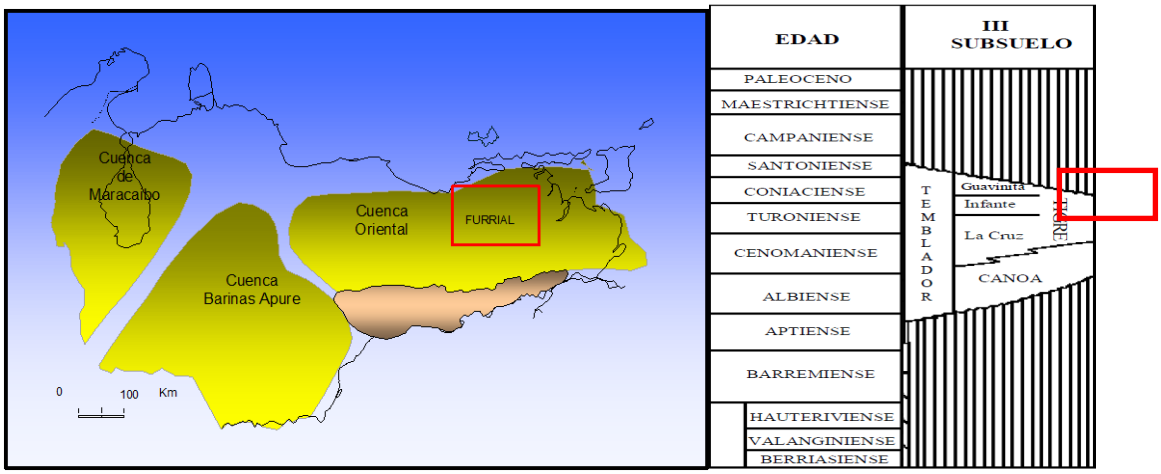
Lista de Tablas

Tabla 1. **Límite del área de estudio en coordenadas UTM 10**
Tabla 2. **Tabla de resumen de estratigrafía por secuencias de la sub-cuenca de maturín, al norte del estado Monagas..... 21**
Tabla 3. **Periodo de los Ciclos del Nivel del Mar 35**
Tabla 4. **Estilos de Patrones de Apilamiento 37**
Tabla 5. **Factores fotoeléctricos de minerales presentes en rocas sedimentarias (Schlumberger, sin fecha) 44**
Tabla 6. **Tipos de variables empleadas en el presente trabajo de investigación 52**
Tabla 7. **Modelo numérico de estratigrafía por secuencias V-9 ..... 68**
Tabla 8. **Coeficientes aprendidos por minería de datos 69**
Tabla 9. **Modelo cuantitativo de estratigrafía por secuencias 77**
Tabla 10. **Ajustes por sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias 78**
Tabla 11. **Diferencia en profundidad entre las tablas anteriores 78**
Tabla 12. **Para el pozo P1 ..... 84**
Tabla 13. **Para el pozo P2 ..... 84**
Tabla 14. **Para el pozo P3 ..... 85**
Tabla 15. **Para el pozo P4 ..... 85**
Tabla 16. **Para el pozo P5 ..... 85**
Tabla 17. **Análisis comparativo con la información de núcleos 87**
Tabla 18. **Análisis comparativo con la información de núcleos 88**
Tabla 19. **Análisis comparativo con la información de núcleos 89**
Tabla 20. **Análisis comparativo con la información de núcleos 90**
Tabla 21. **Análisis comparativo con la información de núcleos 91**

CAPITULO I

INTRODUCCION

El presente trabajo especial de grado estudia el modelo de estratigrafía por secuencias que realizó y actualizó PDVSA-INTEVEP en el campo el Furrial, con un último reajuste en el año 2006, específicamente en el período Cretácico, y más concretamente en la secuencia más profunda del período antes mencionado, denominada C3 para los efectos de la presente investigación.



(a) **(b)**

Figura 1. (a) Ubicación espacial (tomada del Informe V-9 PDVSA-INTEVEP, 2006), y (b) Ubicación cronológica tomada de Mendoza, 2005)

El Campo El Furrial está ubicado geográficamente a 33 Km al Noroeste de la ciudad de Maturín, estado Monagas, en el oriente de Venezuela (Véase Figura 1).

El estudio está restringido a las áreas de los pozos localizados en el campo El Furrial con una extensión aproximada de 117.4 km^2 y está comprendida entre las coordenadas UTM que se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Límite del área de estudio en coordenadas UTM

POZO	X	Y
P1	444901	1067651
P2	444582	1068982
P3	450467	1073389
P4	449225	1070122
P5	458245	1071790

Desde una perspectiva de estratigrafía por secuencias, este trabajo de investigación estudia el sistema de alto nivel depositacional (*Highstand System Track, HST*) que comienza en la superficie de máxima inundación (*Maximum Flooding Surface, MFS*) denominada MSFC3 hasta el límite de secuencia (*Sequence Boundary, SB*) denominado SBC3. Entre los límites anteriormente enunciados existen cinco superficies de inundación (*Flooding Surface, FS*) que corresponden con topes de lutita, empleados como elementos de correlación entre los pozos que componen la zona de estudio.

Se eligieron cinco pozos con que poseían una gran diversidad de datos disponibles, entre los cuales destacan información de núcleos, y además es posible correlacionar las diferentes superficies del modelo de estratigrafía por secuencias anteriormente explicado. Estos pozos: P1, P2, P3, P4 y P5 tienen además una distribución espacial adecuada para una representación estadística del subsuelo.

La presente investigación emplea diferentes herramientas geoestadísticas computacionales, con el objetivo de determinar los patrones que puedan ser discriminados en los diferentes registros de pozos (rayos gamma [GRC], resistividad [ILD], porosidad [NPHI] y densidad [RHOB]). La metodología utilizada estuvo basada en un criterio geológico, tanto para la elección de los registros de pozos y las medidas estadísticas a ser empleadas, como para los parámetros de umbrales y tolerancias utilizados para la observación de los patrones; es decir que las técnicas geoestadísticas computacionales son representaciones matemáticas que permiten cuantificar fenómenos geológicos con la finalidad de resaltar los patrones de interés. Tales técnicas aplicadas a los modelos estratigráficos por secuencias recibe el nombre de estratigrafía cuantitativa (Koutsoukos E, 2007).

Utilizando las herramientas anteriormente mencionadas se basaron en un sistema de minería de datos, el cual a través de un análisis de sensibilidad permitió interpretar las características del modelo y estimar su grado de imprecisión, este fue deducido con base a la sensibilidad del modelo, tanto por superficies, como por pozos.

Desde hace décadas se emplean los conceptos de "estratigrafía por secuencias", (Vera Torres 1994), dentro de la industria petrolera se emplea fundamentalmente para caracterizar las zonas "prospectivas", es decir, aquellas que son potenciales agentes en el sistema de producción de hidrocarburos. Para la creación de un modelo bajo los principios de esta técnica es necesario integrar una gran cantidad de datos, ponderarlos y sintetizarlos para lograr un resultado correcto, lo cual en muchos de los casos implica el análisis de decenas de pozos, con miles de metros de profundidad, involucrados en dicho modelo de estratigrafía por secuencias, donde cada uno cuenta con varios registros de pozos que deben ser analizados.

La elaboración de un modelo de estratigrafía por secuencias requiere el empleo de una gran cantidad de tiempo, que es necesario para procesar toda la información presente dentro de un sistema petrolero, por tal motivo es necesario contar con un procedimiento que permita a diversos profesionales integrar toda la información recopilada a lo largo de la historia de un yacimiento y así de alguna manera simplificar todos los procesos que conducen al planteamiento y construcción de modelos de estratigrafía por secuencias. Todo esto hace necesario, que se proponga dentro de la industria petrolera nacional una serie de procedimientos y metodologías computacionales que permitan reducir ese tiempo, y que además proporcione modelos estadísticamente y geológicamente significativos y precisos que brinden una visión integrada de la situación.

Se pretendió realizar un mapa de sensibilidad estadística que indicase la fiabilidad del modelo estratigráfico. Esto sin profundizar en la interpretación del modelo, así como tampoco en la crítica del mismo; es la intención del presente trabajo de investigación analizar exclusivamente la coherencia de los datos, evaluando los patrones que se esperarían de acuerdo al modelo estratigráfico planteado, no emitir valoración alguna sobre el modelo, ni realizar interpretaciones estratigráficas en el área de estudio sino proponer un procedimiento que permita conseguir en el menor tiempo posible modelos estratigráficos similares a los establecidos previamente en el área de estudio

I.1. OBJETIVOS

I.1.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología geoestadística-numérica lo suficientemente robusta para evaluar la confiabilidad de la información recopilada en las campañas de exploración (registro de pozos entre otros) utilizando minería de datos con el propósito de analizar la sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias desarrollado con dicha información.

I.1.2. Objetivos Específicos:

- Definir el modelo de estratigrafía por secuencia de la zona en estudio.
- Cuantificar el modelo de estratigrafía por secuencias mencionado anteriormente.
- Validar los modelos computacionales mediante la comparación de estos con el modelo estratigráfico ya establecido para la zona en estudio.
- Definir a través de las técnicas de minería de datos y geoestadística los criterios para evaluar la sensibilidad del Modelo.
- Realizar un mapa que muestre la sensibilidad del modelo.

I.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CAPITULO II: ANTECEDENTES: dedicado a la explicación de los precedentes que dieron base y forma a la presente investigación.

CAPITULO III: GEOLOGÍA REGIONAL: en este capítulo se realiza una explicación a detalle sobre las características del área de estudio en su contexto geológico-estructural.

CAPITULO IV: MARCO TEÓRICO: aquí se explica el fundamento teórico que permite la comprensión de los procedimientos utilizados en el presente trabjo.

CAPITULO V: METODOLOGÍA: donde se explican todos los procedimentos que se llevaron a cabo para la consecución de los resultados.

CAPITULO VI: RESULTADOS: en este capítulo se ilustran y describen los resultados obtenidos a lo largo de la presente investigación.

CAPITULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS: dedicado a explicar las consecuencias e implicaciones que tienen los resultados obtenidos

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

Este capitulo presenta los trabajos más relevantes que han servido de inspiración y referencia para el presente Trabajo Especial de Grado, los cuales se dividen en dos tipos, según el tema fundamental de su estudio: el primero el referido a los trabajos de estratigrafía general y por secuencias que han sido realizados en esta área de estudio, y el segundo tipo se refiere a los trabajos investigativos relacionados con la aplicación de la minería de datos y los análisis de sensibilidad a la ingeniería y ciencias de la tierra, aun cuando no sea específicamente a la estratigrafía por secuencias.

II.1. ANTECEDENTES SOBRE ESTUDIOS DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS.

PDVSA-INTEVEP ha desarrollado diversos estudios dentro del área del norte del estado Monagas, muchos de los cuales se han enfocado específicamente en la estratigrafía por secuencias, dada su eficacia como herramienta en la búsqueda de hidrocarburos. Dichos trabajos de investigación son parte de una larga cadena de investigaciones, de los cuales se seleccionaron las versiones más actualizadas que se tienen. Así mismo se consideraron los trabajos de Di Croce, en el período comprendido entre 1989-1995, dada su exhaustiva investigación, tanto sedimentológica como estratigráfica, dentro del área de interés. A continuación se detallan los trabajos anteriormente mencionados.

En un estudio estratigráfico-sedimentológico detallado en una sección de la Formación San Juan al norte de Aragua de Maturín, estado Monagas realizado por Di Croce *op cit*, se presenta el análisis sedimentológico detallado de seis secciones estratigráficas de la Formación San Juan, expuesta a lo largo de la Serranía de Interior en una franja de este a oeste, que permite exponer los rasgos principales que caracterizan dicha formación.

En este trabajo, en base a las características texturales, porcentaje relativo de las litologías, estructuras sedimentarias, paleontología y variaciones tanto verticales como laterales de las capas de areniscas se reconocieron cinco (5) facies, definidas como sigue: a) litofacies de areniscas estratificadas; b) litofacies de areniscas interestratificadas con lutitas y limolitas; c)

litofacies de secuencia de engrosamiento de las capas de areniscas hacia arriba; d) litofacies de secuencia de adelgazamiento de las capas de areniscas hacia arriba y e) litofacies de paquetes de areniscas alternando con paquetes de lutitas, limolitas y areniscas de grano muy fino.

Dichas secuencia de facies, o secuencias estratigráficas, fueron caracterizadas en base a su génesis y correlacionadas bajo los principios de estratigrafía por secuencias.

Rondón *et al*., (2002) presentan un nuevo estudio integrado del Campo El Furrial (Versión 09), el cual tuvo como objetivo desarrollar un modelo de simulación de yacimientos para evidenciar y explotar de manera eficiente y económica las reservas de crudos medianos remanentes, entrampados en los yacimientos Naricual y Cretáceo. Este informe forma parte del Modelo Estático de los yacimientos antes mencionados. Teniendo como objetivo proveer una interpretación crono-estratigráfica detallada de las heterogeneidades de los yacimientos, tanto en sus extensiones verticales como laterales, que permita la ejecución de la predicción del movimiento de los fluidos dentro y entre las unidades de flujo mediante la simulación numérica del yacimiento. También sirvió de marco estratigráfico al modelo sedimentológico del campo. El principal aporte de la investigación antes mencionada fue un modelo de secuencias estratigráficas, el cual fue posteriormente actualizado en la síntesis sedimentológica del Reservorio Cretácico durante el 2003.

Laval (2006) en un estudio realizado por BEICIP-FRANLAB presenta una síntesis de los datos sedimentológicos existentes en el yacimiento “Cretáceo” del campo El Furrial, realizado durante noviembre 2003 en Puerto La Cruz. El campo El Furrial está compuesto de 3 yacimientos principales Naricual Superior, Naricual Inferior y Cretáceo. Para el Naricual Superior, se elaboró un modelo sedimentológico detallado como elemento importante del modelo integral del campo El Furrial. También para el Naricual Inferior se realizó en 2003 un modelo sedimentológico de manera a completar el modelo estático del campo (Laval A. & Itriago L. 2003). En estas dos últimas formaciones los marcadores utilizados en el modelo estratigráfico (V9) presentaban una muy buena definición y continuidades laterales siempre superiores al tamaño del campo. Las correlaciones establecidas fueron usadas como cuadro para elaborar los modelos sedimentológicos. De acuerdo con en el informe estratigráfico V9 en el yacimiento Cretáceo los marcadores definidos no presentan, a veces, mucha continuidad y por consecuencia no pueden ser utilizados directamente para la elaboración de un modelo detallado tal como para la formación Naricual.

II.2. ANTECEDENTES SOBRE MINERÍA DE DATOS APLICADA A LAS CIENCIAS DE LA TIERRA Y ALGUNOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE ESTRATIGRAFÍA CUANTITATIVA

Actualmente la computación está ampliamente difundida como una herramienta aplicada al estudio de las ciencias de la tierra, su capacidad de procesamiento y utilidad en otros campos de la ingeniería ha permitido la aplicación de ciertas técnicas y el desarrollo de algunas metodologías para el procesamiento de datos geológicos que van desde los registros petrofísicos hasta el procesamiento de las adquisiciones directas de campo. A continuación se detallan algunos trabajos de investigación que han sido desarrollados como una aplicación de la computación, más específicamente de la minería de datos y los análisis de sensibilidad a las ciencias de la tierra para el procesamiento de los datos geológicos.

Juozapavičius y Rapševičius (2001) muestra un análisis eficiente utilizando algoritmos de minería de datos, denominados algoritmos de panelamiento jerárquico, los cuales fueron empleados para el procesamiento de datos geológicos. La presente investigación estudia por medio de este método las relaciones entre los diferentes datos geológicos. Los datos geológicos provienen de perforaciones mineras y describen los estratos de depositación.

Meyers *et al*., (2001) integraron diversos datos de la Formación Bridge Creek de edad Cenomaniense-Turononiense integrando técnicas de la estratigrafía cuantitativa con análisis armónico evolutivo y modelos esgtratigráficos.

Sharma (2006) estableció una serie de técnicas matemáticas y numéricas con el propósito de realizar mediante inversión numérica la búsqueda automatizada de modelos estratigráficos variando una gran cantidad de parámetros.

Zhang *et al*., (2009) indican que el uso de los sensores remotos ha tenido una importancia creciente en diversos ámbitos de aplicación, como por ejemplo la supervisión ambiental, la detección de cambios, los riesgos de incendios y diversos usos en las ciencias de la tierra. Muchas técnicas avanzadas han sido desarrolladas para analizar estas imágenes, precisamente para mejorar la precisión de las clasificaciones en el contexto de aplicación. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas son cajas negras para los usuarios, dejándolas con poco o ningún control para mejorar o afinar aun más el proceso de clasificación, especialmente para las técnicas no supervisadas.

El presente trabajo utiliza la minería de datos como una herramienta que le permita al usuario un cierto grado de control que le facilite la clasificación de los datos de una forma más

adecuada, agregando una capacidad de supervisión y corrección que permite optimizar los resultados.

China Papers (2010) realizaron importantes aportes en el uso de la estratigrafía por secuencias en márgenes activos dentro de China, en lugares definidos y comprobados como reservorios de petróleo. Específicamente se centró en el estudio de los límites de secuencias, así como la configuración de las mismas para obtener la génesis, espesor y posición de los estratos de arenas con el objetivo de identificar trampas ocultas donde pudieran existir reservas de petróleo. Los datos empleados fueron perfiles sísmicos 2D los cuales fueron caracterizados de acuerdo a sus propiedades acústicas.

Este estudio fue de importancia para el presente trabajo especial de grado porque se centra en la identificación de cierto tipo de litología, en este caso los estratos de arenas, con un objetivo prospectivo en área de los hidrocarburos, lo cual está relacionado con la presente investigación en la que se identificaron los estratos de lutita a través del procesamiento e interpretación de los datos de los registros de pozos, en este caso.

Hejazi y Cai (2011) promovieron un acercamiento novedoso en el desarrollo de las rutinas de operación de reservorios que aprenden de los valores históricos en las operaciones del mismo. El marco propuesto involucra el descubrimiento de conocimiento a través del aprendizaje de los las decisiones tomadas en cada circunstancia. Efectivamente el sistema desarrollado por los autores asocia los datos leídos y la decisión tomada para cada caso, extrayendo de estas asociaciones un conocimiento a través de la minería de datos que luego se aplica a las situaciones que se presentan a futuro, cuando un patrón muy parecido es observado nuevamente.

CAPITULO III

GEOLOGÍA DEL NORTE DE MONAGAS

El estudio del modelo de estratigrafía por secuencias requiere una contextualización, tanto en el sentido espacial como en el sentido temporal. Para la construcción de un modelo numérico y posteriormente un análisis geoestadístico es necesario validar y revisar profundamente el modelo estratigráfico en cuestión, es por ello que a continuación se incluye la información recopilada tanto de la bibliografía pertinente, así como de los diversos informes referidos al área de estudio dentro de PDVSA-INTEVEP.

El presente capitulo comprende:

- Marco geólogico regional y descripción téctonica-estructural
- Formaciones presentes en el área de estudio.
- Estratigrafía por secuencias para brindar una visión deductiva de la geología encontrada.

Una parte de la bibliografía consultada es anterior a la nomenclatura y los métodos de estratigrafía por secuencias, sin embargo el detalle y lo extensivo de los levantamientos geológicos, así como la sólida interpretación de ambientes a través de la observación de estructuras sedimentarias, litología y bioestratigrafía la hacen una valiosa fuente de información. Por tal razón, se han consultado diversos autores que han trabajado en zonas relacionadas con la presente área de estudio, utilizando las más modernas técnicas de estratigrafía por secuencias, con el objeto de traducir los trabajos previos a la nomenclatura moderna, dando un primer paso en la unificación de la nomenclatura y la actualización de la base de datos geológica.

III.1. MARCO REGIONAL Y DESCRIPCIÓN TECTÓNICO-ESTRUCTURAL

La Cuenca Oriental de Venezuela (COV) tiene una longitud de más de 800 Km en dirección Este-Oeste con un ancho promedio de 200 a.m. en dirección N-S, cubriendo unos 175.535 Km^2 en los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro y algo menor en el Estado Sucre. La cuenca es asimétrica con un flanco norte más inclinado y tectonizado hacia el norte, este es conectado a la zona fallada y plegada del flanco sur de las cordilleras del Sistema Montañoso del Caribe.

A pesar de que la COV no mostró una forma similar a la actual, sino a partir del Eoceno Tardío-Mioceno Temprano (~20 Ma) la protocuenca comenzó hacia el Devónico- Carbonífero hace aproximadamente 350 Ma. Durante ese tiempo se distinguen tres grandes ciclos sedimentarios separados por orogenias y posteriores y largos periodos de erosión y pleneplanación (Mendoza, 2005).

La trasgresión avanzó hasta hace unos 100 Ma cuando cambiaron las condiciones de marinas abiertas a con estancamiento de aguas, captación de carbono orgánico y poco aporte de clásticos, condiciones que se prolongaron hasta los 75 Ma, cubriendo los mares desde la Guajira hasta Trinidad en sentido O-E. A partir de los 75 Ma y hasta el final del Cretácico, el régimen sedimentario cambió, el mar fue abierto a la circulación, recibió un volumen extraordinario de sedimentos epiclásticos y al final del Mesozoico las condiciones fueron regresivas, de retirada general de los mares, con nuevos levantamientos y terrenos expuestos a la erosión

Las secuencias cretácicas del occidente y del oriente de Venezuela reflejan espesores superiores a los 4.000 m, de carácter plataformal (Grupos Cogollo y Sucre) asociado a una profundización progresiva, en el espacio y en el tiempo, con un máximo de trasgresión marina durante el Cretácico intermedio, Santoniense-Coniaciense, llegando las aguas hacia el sur, hasta la confluencia del Río Meta en El Arauca y El Apure por el oeste y hasta la actual Ciudad Bolívar por el este. Este máximo marino transgresivo esta representado por las rocas madres del petróleo (formaciones La Luna al oeste y Querecual al este de Venezuela, Formación Naparima Hill de Trinidad y formaciones Eagleford y Agua Nueva del Golfo de México).

Las secuencias cretácicas del oriente de Venezuela reflejan espesores superiores a los 4.000 m, de carácter plataformal (Grupos Cogollo y Sucre) asociado a una profundización progresiva, en el espacio y en el tiempo, con un máximo de trasgresión marina durante el Cretácico intermedio, Santoniense-Coniaciense, llegando las aguas hacia el sur, hasta la confluencia del Río Meta en El Arauca y El Apure por el oeste y hasta la actual Ciudad Bolívar por el este.

En el Cretácico intermedio, Cenomaniense-Coniaciense (100-85 Ma) la trasgresión marina alcanzó su máximo y en ambientes de poca circulación, marinos profundos, euxinicos, en el norte se depositó la Formación Querecual, principal generadora de hidrocarburos en el Oriente, pasando al Sur a ambientes menos profundos de la Formación El Tigre.

En el Cretácico Tardío (85-65 Ma), Santoniense-Maastrichtiense, se sedimentaron al norte lutitas marinas y algunas ftanitas y areniscas de grano fino de la Formación San Antonio, mientras que al Sur comenzó la regresión marina, con la sedimentación de areniscas masivas,

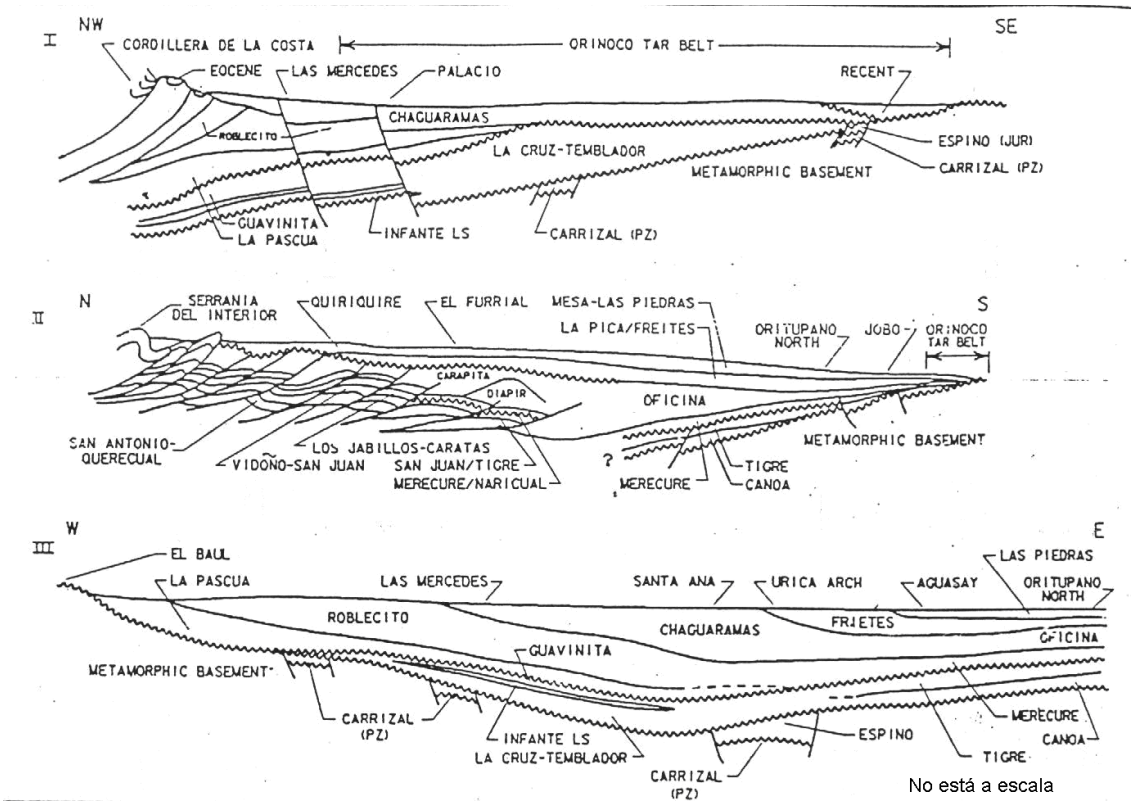
bien escogidas, de costas muy activas y oxigenadas, de la Formación San Juan, cuya sedimentación se extendió desde el Maastrichtiense hasta el Paleoceno Temprano.

III.1.1. Modelo estructural del área de estudio (V-9. PDVSA-INTEVEP, 2002)

El campo El Furrial está ubicado estructuralmente en la parte de mayor complejidad de la Cuenca Oriental de Venezuela, regionalmente se puede describir como un anticlinal ligeramente asimétrico orientado en sentido OSO-ENE, con un buzamiento variable entre 15° y 21° en el flanco norte y en el flanco Sur entre 18° y 25°. El rumbo general del anticlinal es N 60°- 90° E. El desplazamiento lateral está estimado en 10 Km, y el salto vertical en el orden de 3 Km Este bloque contiene 2 pliegues, el pliegue mayor es un anticlinal de rampa frontal, pero hacia el norte existe una estructura menor que corresponde a un pliegue de propagación de falla, la cual es un evento posterior. Además, se reconoce un fallamiento intenso con fallas inversas paralelas al corrimiento en su flanco Sur y fallas transversales al anticlinal, como lo son las fallas de rasgadura.

Específicamente el área de estudio se ubica en la subcuenca de Maturín en el piedemonte de la Serranía del Interior al norte del Edo. Monagas. Localmente se caracteriza por pliegues asociados a rampas anticlinales que convergen al sur. La rampa de El Furrial es la más al sur que involucra sedimentos esencialmente arenosos con carácter de yacimiento, con edades cretácicas.

En la Figura 2 se puede observa tres perfiles que de forma aproximada muestran el subsuelo de la Subcuenca de Maturín, desde el Arco del Baúl al oeste hasta el río Orinoco al Sur y la Serranía del Interior al Norte. En el subsuelo se encuentra el miembro Guavinita de la Fm. Tigre, del Grupo Temblador tal como se observa en el tercer perfil, puede observarse también la complejidad estructural de la zona y que el miembro Guavinita es uno de los menos afectados por las deformaciones tectónicas.



~~~~ Límite de secuencia

------ Límite de la formación

Figura 2. Marco estructural del área de estudio (Modificado de Patterson y Wilson, 1953; Young et al, 1956; González de Juana, 1980; Carnevalli, 1988; Subieta et al, 1988; CEPET, 1989 y Lander et al, 1990)

III.2. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación se explicará en detalle las características estratigráficas de la subcuenca de Maturín, perteneciente a la Cuenca Oriental de Venezuela, a través de tablas e imágenes ilustrativas de las características del subsuelo y la diposición de los estratos. El presente apartado ha sido ordenado siguiendo la secuencia lógica y cronólogica de los eventos geológicos, por lo que las formaciones se explican comenzando en la más antigua y por tanto la más profunda hasta la más joven y por tanto la más somera dada la depositación normal que impera en el área de interés.
~~~~

Tabla 2. Tabla de resumen de estratigrafía por secuencias de la sub-cuenca de maturín, al norte del estado Monagas.

Columna Estratigráfica de las formaciones	Sistema Depositacional	Descripción
~~	Hiatus (FSST no depositado)	Comienza la deformación tectónica, Mendoza 2005 (González de Juana, *et al.*, 1980).
Tigre, Guavinita Patterson y Wilson, 1953	HST	Está constituido por un intervalo basal lutítico de unos 15 m de espesor, seguido de intercalaciones de areniscas, lutitas, margas, calizas delgadas y ftanitas negras, todas con restos de peces y/o nódulos fosfáticos, con un espesor de unos 30 m.
Tigre, Infante Patterson y Wilson (1953)	TST	Constituido por una caliza densa, compacta y fosilífera, gris, localmente glauconítica. Hacia el sur y noroeste se va haciendo más arenoso hasta convertirse en areniscas que no se pueden diferenciar de los miembros infra- y suprayacentes.
Tigre, La Cruz Patterson y Wilson (1953)		El cual está constituido por un miembro inferior de areniscas lenticulares, caoliníticas, de grano grueso, con intercalaciones menores de lutita negra, carbonosa y fosilífera, y uno superior que se inicia con una lutita negra fosilífera y continua con areniscas de grano fino, calcáreas y glauconíticas que presentan intercalaciones delgadas de lutita muy fosilífera.
Canoa **Hedberg, 1950**	LST	Conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y arcilitas generalmente moteadas con manchas grises, gris verdoso, amarillo, marrón, rojo, púrpura. Se encuentran también algunos intervalos de grano grueso, areniscas y limolitas blanquecinas, pulverulentas e intercalaciones de arcilita gris azulada, con restos de plantas.
~~ ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	Hiatus (FSST no depositado)	**Hedberg, *et al.*, 1947**

III.2.1. Grupo Sucre

Hedberg (1950-a), introdujo este nombre para abarcar las formaciones de edad Cretácico, infrayacente al Grupo Guayuta (Formación Querecual), en la serranía del interior oriental. Originalmente incluía las formaciones Barranquín, Garcia, El Cantil y Chimana, un ciclo transgresivo que se inicia con conglomerados y areniscas, seguidas de un intervalo calcáreo, para terminar con predominio lutítico (Hedberg y Pyre, 1944).

Formación Barranquín

Liddle, 1928 y 1946 y posteriormente Hedberg 1944 y 1950, definieron la formación como de Edad Cretácico Temprano y con aproximadamente 1500 metros de espesor. Está compuesta por grandes espesores de areniscas cuarcíticas de colores rojizos y blancos intercaladas con lutitas de diversos colores con capas ocasionales de calizas verdosas o negras más comunmente vistas al tope de la formación. Esta formación está formalmente dividida en dos miembros: Morro Blanco y Picuda.

Miembro Morro Blanco

Esta unidad dominantemente carbonática (75% de calizas biostrómicas, nodulares y biomicríticas de color gris y gris azulado), intercalada con secuencias de lutitas y asperones semejantes al miembro infrayacente. Su espesor es de más de 300 m, y su edad es Valanginiense-Hauteriviense, en base a la abundante macrofauna que contiene. Según Rosales (1960), sólo aflora en una reducida zona alrededor de su localidad tipo, y hacia el sur pasa a una espesa secuencia de areniscas. Macsotay y Vivas (1985), Macsotay et al., (1985) y Vivas (en prensa), la señalan del dominio del archipiélago Guaiquerí-Manare-Cumaná, extendida hasta la región de Casanay, en el extremo oriental de la Serranía del Interior Oriental. Yoris (1985-a) la reconoce en la parte oriental del Bloque de Caripe.

Miembro Picuda

Esta unidad fue descrita originalmente por Von der Osten (1954, 1957) de Edad Cretácica entre los Pisos del Barremiense-Aptiensecomo, con un espesor de 425 metros de areniscas cuarcíticas, interestratificadas con lutitas multicolores, suprayacente a las calizas del Miembro Morro Blanco de la Formación Barranquín. Su localidad tipo se encuentra en la isla Picuda Grande, frente a la costa occidental del Estado Sucre.

Formación Garcia

De Edad Cretácica pertenienciente al Aptiense Tardío, constituída en su sección tipo, por lutitas oscuras (95%) y delgadas capas de areniscas de grano fino (3%), y calizas arcillosas (2%)

(Falcón, 1989). Las lutitas presentan un color gris oscuro, el cual meteoriza a marrón claro o crema, son calcáreas, bien laminadas, compactas y muy fosilíferas hacia la parte inferior de la sección, se hacen arenosas en la parte superior de la unidad, y su color fresco cambia a marrón, debido a un cambio en las condiciones ambientales de sedimentación, el cual es confirmado por las evidencias paleontológicas.

Formación Taguarumo

Von Der Osten (1954) definió a Taguarumo, como el miembro superior de la Formación Barranquín, *sensu* Liddle (1928, 1946). Guillaume *et al.*, (1972), lo ascienden al rango formacional, lo cual es criticado por Rosales (1976) por considerar que la separación de Taguarumo de la Formación Barranquín, es de carácter bioestratigráfico y no litoestratigráfico. Macsotay *et al.*, (1986), mantienen el caracter formacional, sustentado por criterios litoestratigráficos distintivos. El término Taguarumo como miembro, aparece en ambas ediciones previas del Léxico Estratigráfico de Venezuela (LEV), pero carente de su criterio de validez. Es por este motivo que para el presente trabajo especial de grado se asume a Taguarumo en su rango formacional tal como lo propone formalmente el LEV.

Consiste en una secuencia con mayor presencia de lutitas y menor proporción de areniscas, intercaladas frecuentemente con calizas verdes con Trigonia (Von Der Osten, 1954). Las lutitas negras y areniscas se hallan en paquetes macizos plurimétricos. Macsotay et al., (1986), distingue la Formación Taguarumo en base a que sus intervalos pelíticos están dominados por ritmitas limo-arenosas (lutitas arenosas de Von Der Osten, op. cit.) y limolitas. Las ortocuarcitas son de colores claros, las limolitas son negras, meteorizando a rojo, amarillo y verdoso; las ritmitas son de color gris a castaño. La estructura sedimentaria dominante en las ortocuarcitas, es la estratificación cruzada. La bioturbación de la icnofacies de Chondrites es frecuente en las perlitas; en la base de las calizas se observan galerías de Macanopsis y las Thalassinoides. Las ortocuarcitas forman capas competentes, no lenticulares.

Formación El Cantil

La FEC (Liddle, 1928) aflora en El Cantil del Río Púnceres, estado Monagas, pero Rosales (1959) propuso como sección de referencia Pico García-Cerro La Paloma, con más de 800 m de espesor, donde se compone litológicamente de areniscas glauconíticas que descansan sobre margas del Miembro García, siguen luego una intercalación de areniscas y calizas, siendo más abundantes las primeras hacia el sur y las calizas son más importantes hacia el norte, donde pasa a la facies equivalente de la Formación Borracha y hacia su tope con la Formación Chimana. Algunos autores consideran a la Formación El Cantil en parte equivalente con la

Formación Canoa al sur. El intervalo calcáreo de Cerro El Pato y Piedra fue definido por Vivas y Macsotay (1995) como Formaciòn Chuparipal de edad Barremiense-Aptiense. La FEC yace en contacto concordante sobre la FB y por debajo de la Formación Querecual, pero contrastando fuertemente su ambiente oxigenado de calizas azuladas grises muy ricas en carbonatos de calcio, en contraposición con el ambiente anóxico de las calizas negras, fétidas, laminadas, ricas en pirita y materia orgánica de la Formación Querecual.

Formación Chimana

La FCh (Hedeberg y Pyre 1944) tiene su localidad y sección tipo en la Isla Chimada Grande al norte de Puerto La Cruz, con un predominio de lutitas físiles, fosíliferas del Albiense Superior y algunas areniscas glauconíticas. La FCh es el equivalente superior lutítico marino más profundo de la Formación El Cantil. Esta formación ocupó una gran extensión por Caripe, Cumanacoa y luego de Paria aparece de nuevo en Trinidad. Al parecer, la cordillera alóctona de Paria podría estar cubriendo la continuidad de la formación Chimana, que debió extenderse originalmente desde cerca de Puerto La Cruz hasta Trinidad por lo menos.

III.2.2. Grupo Guayuta:

El Cenomaniense marca un avance notable de la transgresión marina en Venezuela Oriental similar y correspondiente con lo registrado en la Cuenca Occidental, llegando ambas regiones a estar totalmente comunicadas al menos durante el máximo de tal transgresión marina. Es un lapso de sedimentación tranquila en condiciones euxinicas, anóxicas, azufre reductoras, con gran acumulación de material orgánico. Estas condiciones fueron menos reductoras, más oxigenadas, de ambientes neríticos y hacia el cratón de Guayana llegaron a costero-litorales. El Grupo Guayuta (Liddle 1928, Hedberg, 1937) se compone de las formaciones Querecual y San Antonio:

Formación Querecual (Tomado del Léxico Estratigráfico en línea)

Consiste de calizas arcillosas con estratificación delgada, laminadas, carbonáceo-bituminosas y lutitas calcáreas. El color de las calizas y lutitas es típicamente negro, aunque también han sido reportados colores claros para la unidad, en el subsuelo de la cuenca oriental (Hay y Aymard, 1977), la laminación alcanza valores entre 10 y 20 láminas por pulgada, (Hedberg, 1950), atribuidas a la alternancia de foraminíferos planctónicos con material carbonoso. Son abundantes las formas discoidales, esferoidales y elipsoidales y han sido descritas como concreciones, alcanzando diámetros entre unas cuantas pulgadas, hasta varios pies (*ibidem*), así como también se ha observado, que la laminación puede envolverlas o

desvanecerse dentro de ellas (González de Juana *et al.*, 1980). El contenido de pirita de la unidad, también es característico y es el responsable de las fuentes sulfurosas que frecuentemente se presentan en sus afloramientos (González de Juana *et al.*, *op. cit.*). Las estructuras definidas por muchos autores como concrecionarías, han sido reportadas como de almohadilla y bola por estiramiento de capas, por Macsotay *et al.* (1985).

Hay y Aymard (*op. cit.*), reportan la presencia de "muy pocas areniscas grises, blancas, calcáreas y glauconíticas". Campos *et al.* (1985), mencionan 20% de areniscas, para el total de la unidad en el pozo La Vieja-1, aumentando hacia el sur (53% en el pozo Tala-1).

Yoris (1988), la restringe al talud medio a inferior (margen pasivo), para los afloramientos del sur y este de la Serranía del Interior, y postula la existencia de corrientes de borde que retrabajaron y escogieron el material, causando en algunos espacios cortos de tiempo, ambientes más oxigenados que permitieron a algunos organismos vivir en el fondo marino y provocar bioturbación; este último rasgo constituye un aspecto que debe ser cuantificado en el futuro, con estudios detallados de estructuras sedimentarias, paleontología y análisis geoquímicos de materia orgánica.

Furrer y Castro (*op. cit.*) consideran que el inicio de la deposición de la Formación Querecual se caracterizó por la aparición de facies carbonatadas negras y laminadas, asociadas al enrarecimiento de las facies bioturbadas y a la desaparición de los foraminíferos bentónicos; la parte final por la reaparición de foraminíferos bénticos, de facies bioturbadas y la presencia frecuente de aportes detríticos de cuarzo. Indican además que la Formación Querecual no representa una anoxia contínua, sino un ambiente pobre en oxigeno, el cual es a menudo interrumpido por breves episodios.

Formación San Antonio

La sección tipo de la FSA (Hedberg, 1937) se encuentra en el Río Querecual en el Cerro San Antonio al norte de Bergantín compuesta de predominantes lutitas negras y laminadas sobre las calizas y particularmente areniscas grises, duras, finas y frecuentemente calcáreas e intervalos de ftanitas. Tanto las calizas como las lutitas son arenosas y algunas calizas son ftaniticas. Las ftanitas son similares y presentan los mismos tipos que la Ftanita de El Táchira.

Las ftanitas arcillosas contienen foraminíferos bentónicos indicando la presencia de ambientes de aguas agitadas, oxigenadas. La FSA es concordante con la infrayacente FQ y con la suprayacente Formación San Juán del Grupo Santa Anita. La FSA tiene un espesor de 350 m de espesor y es equivalente hacia el Sur a la Formación Tigre, parte superior. Su edad

determinada por abundantes foraminíferos bentónicos llega al Campaniense e incluso algunos fósiles (Globotrunca gansseri) sugieren hasta edad Maastrichtiense.

III.2.3. Grupo Temblador:

El GT (Dusenbury, 1960), con sección tipo en el pozo Tigre-1, representa la sedimentación comprendida entre un basamento ígneo-metamórfico Precámbrico y sedimentos del Terciario Superior, definido en el Campo Petrolero Temblador y que se extiende en el subsuelo de Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro y se divide en dos formaciones, una inferior de carácter continental, la Formación Canoa y otra superior concordante de ambiente marino, Formación Tigre. En el subsuelo de Guárico, la Formación Tigre se divide en tres miembros, que de más antiguo a más joven son La Cruz, Infante y Guaninita (Véase Figura 3) Las rocas de la FC no tienen fósiles y se le asigna una edad arbitraria pre-Formación Tigre, o sea Albiense Superior a Santoniense. (Tomado de Mendoza, 2005)

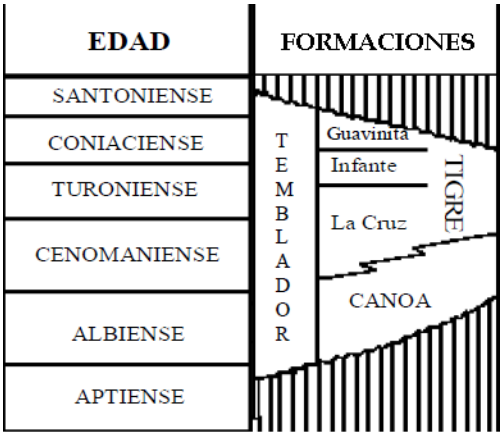


Figura 3. Grupo Temblador

Formación Canoa

Esta tiene un contacto inferior marcadamente discordante sobre una superficie aparentemente peneplanada, constituida por rocas ígneas y metamórficas del basamento, o localmente con las formaciones Hato Viejo y Carrizal (Hedberg, *et al.*, 1947). Modelos estructurales aplicados a la zona.

Está compuesta principalmente por conglomerados y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y arcilitas generalmente moteadas con manchas grises, gris verdoso, amarillo, marrón, rojo, púrpura (Hedberg, 1950). Se encuentran también algunos intervalos de grano grueso, areniscas y limolitas blanquecinas, pulverulentas e intercalaciones de arcilita gris azulada, con restos de plantas (Hedberg, *op. cit.*). En el subsuelo de Guárico, consta de lutitas y

arcilitas irregularmente estratificadas, típicamente abigarradas, en tonos de gris, verde, rojo, amarillo y morado, con algunas areniscas moteadas (Patterson y Wilson, 1953). El conjunto de minerales pesados característicos de esta unidad, corresponden a una suite verde (magnetita-ilmenita-zircón-turmalina-epídoto-zoisita); y menores cantidades de estaurolita y anfíboles sin diferenciar (Escalona, 1985). Lo que sugiere su depositación en ambientes continentales (Hedberg *et al.*, 1947). Según Sinanoglu (*op. cit.*) el ambiente sedimentario es fluvial, probablemente de "point bar", en aguas llanas no-marinas "sub-arial", bajo clima árida y una topografía plana.

Formación Tigre

Información general sobre la formación: La presencia en forma persistente en la región de Guárico de un nivel de calizas (Patterson y Wilson, *op. cit.*) ha dado lugar a una división de la formación en tres miembros: Miembro La Cruz (inferior), El Miembro Infante (medio) y el Miembro guaninita (superior).

La Cruz: está constituido por un miembro inferior de areniscas lenticulares, caoliníticas, de grano grueso, con intercalaciones menores de lutita negra, carbonosa y fosilífera, y uno superior que se inicia con una lutita negra fosilífera y continua con areniscas de grano fino, calcáreas y glauconíticas que presentan intercalaciones delgadas de lutita muy fosilífera.

Infante: constituido por una caliza densa, compacta y fosilífera, gris, localmente glauconítica. Hacia el sur y noroeste se va haciendo más arenoso hasta convertirse en areniscas que no se pueden diferenciar de los miembros infra- y suprayacentes.

Guavinita: está constituido por un intervalo basal lutítico de unos 15 m de espesor, seguido de intercalaciones de areniscas, lutitas, margas, calizas delgadas y ftanitas negras, todas con restos de peces y/o nódulos fosfáticos, con un espesor de unos 30 m. González de Juana, et al (1980) indica que la formación El Tigre tiene un hiatos de larga duración al tope que erosionó completamente el Campaniense.

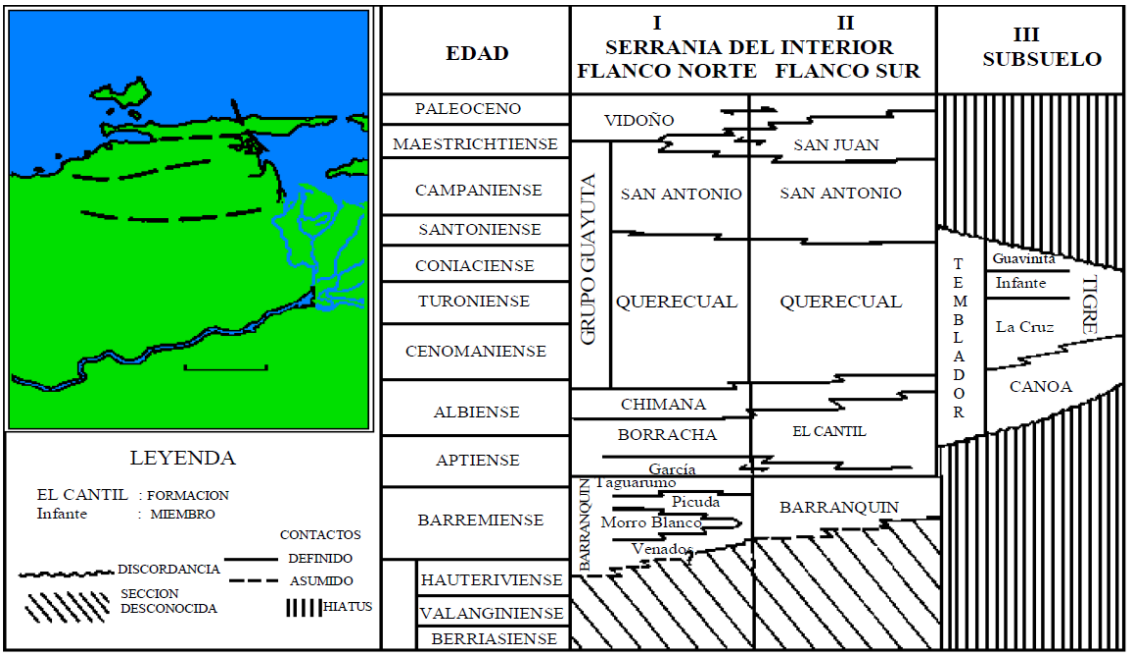


Figura 4. Tabla de formaciones en el área de estudio (Tomado de Mendoza, 2005)

Formación San Juan (Tomado del Léxico Estratigráfico en línea)

La formación está acotada en su base por un contacto concordante pero abrupto, con las limolitas negras de la Formación San Antonio infrayacente. Su contacto superior es gradacional a las pelitas negras de la Formación Vidoño, suprayacente. Posee forma prismática, y presenta transición lateral a unidades pelíticas en todas direcciones (Rosales, 1972, fig. 4)

Litológicamente está compuesta por una alternancia monótona de capas de areniscas de 0,3 a 1 m de espesor, muy duras, gris a gris claro de grano fino, bien escogidas, escasamente glauconíticas y localmente calcáreas. Estas capas de areniscas se intercalan con capas centimétricas de lutitas negras, arenáceas, localmente calcáreas y limolitas negras. En los ríos Aragua, Orégano y en la quebrada La Pegua, las areniscas del tope se tornan muy glauconíticas. Las capas de arenisca son tabulares, y su color de meteorización es crema y rojizo. Las estructuras sedimentarias más comunes son: estructuras de carga, estructuras de almohadilla y bola (en las areniscas), diques y sills clásticos, capas estiradas y estructuras de desplomes arenosos. (Rosales, 1960)

III.3. BIOESTRATIGRAFÍA

En el informe V-9 INTEVEP-PDVSA se reportan, en la ventana de estudio, los siguientes palinomorfos fósiles como marcadores, los cuales determinan la edad cretácica de la secuencia.

- *Ariadnaesporites* (espora)
- *Spinizonoculpites echiatus* (polen)
- *Spinizonoculpites bacuatus* (polen)

En los reportes analizados de los estudios palinológicos que se efectuaron para la realización del informe anteriormente citado se observó que los fósiles hallados a lo largo de la secuencia estratigráfica son correlativos para los pozos P1, P2, P3, P4 y P5 que limitan el área de interés, así también (Cabrera y Villain, 1987) identifican para el miembro Guavinita los siguientes géneros de foraminíferos:

- *Lenticulina*
- *Hedbergella*

III.4. PRINCIPALES PROBLEMAS DE LOS MODELOS ESTRATIGRÁFICOS Y SU ACOPLAMIENTO CON LOS MODELOS ESTRUCTURALES

El marco tectónico existente durante la ventana de tiempo elegida para el presente estudio corresponde a un margen pasivo con poca o ninguna actividad sintectónica a la depositación, esto permite un estudio clásico de estratigrafía por secuencias, sin embargo posteriormente a dicha ventana de tiempo hubo diversos eventos tectónicos que deformaron la secuencia estratigráfica. Dicha severa deformación planteó una limitación para la correlación de los pozos en un sentido espacial, por lo que la correlación se realizó con respecto al marco temporal y no con respecto a la profundidad, siendo los marcadores en cada pozo un evento ocurrido en un tiempo dado y cuya profundidad tiene relevancia sólo para el pozo en cuestión. Este método permitió la correlación en base al momento en que ocurrió cada evento, en vez del espesor acumulado.

III.5. MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS

En el año 2006 se hizo una revisión, actualización y ampliación del modelo de estratigrafía por secuencias propuesto para el área del campo "El Furrial". Dicho modelo fue planteado en el Informe de Estratigrafía por Secuencias V-9 (Rondón et al, 2002) a partir de los

modelos previos resumidos en el Proyecto Integrado del norte de Monagas (PINM) al cual se le agregó nueva información, nuevos pozos (con registros y núcleos) datos sísmicos y actualizaciones en base a una revisión de lo anterior, posteriormente en ese trabajo se hizo una revisión y validación de la información disponible desarrollando un modelo estratigráfico a nivel del Cretácico en el campo "El Furrial", en el informe desarrollado por Ruiz F y Oropeza H.

El modelo de secuencias estratigráficas que se empleó en el presente trabajo de investigación se extrajo del nodelo estratigráfico a nivel del Cretácico (op cit.) tomando un área reducida del campo "El Furrial" y dentro de esta área, aquellos pozos que tuvieran registros de pozos y núcleos, así como otra información complementaria que brindara una sólida confiabilidad con la intención de plantear una metodología competente para el análisis de minería de datos y su posterior estudio de confiabilidad.

La imagen que se muestra a continuación (Figura 5) representa el modelo de secuencias estratigráficas que se plantea en el Informe de Ruiz F y Oropeza H, 2006, mostrando los espesores a escala, sin embargo la posición vertical de los datum en cada es una correlación temporal que poco o nada tiene que ver con su profundidad real en cada uno de los casos.

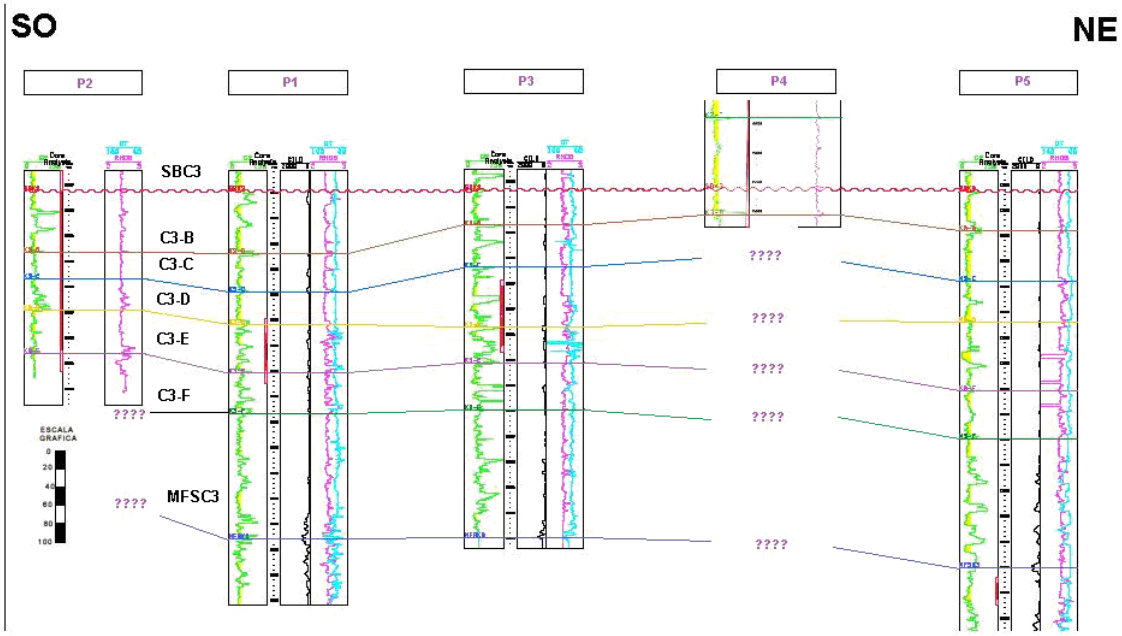


Figura 5. Modelo de secuencias estratigráficas del campo "El Furrial" del Informe: Revisión y validación del Modelo Estratigráfico a nivel del Cretácico.

III.5.1. Superficies convencionales de estratigrafía por secuencias y sus parasecuencias:

En el área de estudio se establecieron dos superficies de tercer orden (MFSC3 y SBC3), así como cinco superficies de orden superior (C3, de la B a la F) que corresponden con marcadores arcillosos (topes de lutita) para definir el sistema depositacional que da contexto a la información analizada, en total se especifican 6 parasecuencias.

- **Parasecuencia C3-F (C3F-MFSC3):** no tiene núcleo en el campo El Furrial. Esta es la parasecuencia más profunda, definida por Carrillo et al. (2003), en Carito. Solo unos pocos pozos pozos la penetran en El Furrial. Está definida como una *Superficie de Máxima Inundación* (MFS) que acota la ventana de estudio a la base, ha sido descrita para todos los pozos como una capa de lutita muy gruesa, en algunos casos de color negro y totalmente monótona.
- **La parasecuencia C3-E (C3-E - C3-F):** tiene núcleos en solo 2 pozos en el campo El Furrial: P2 y P1. En la sección estratigráfica de la figura 5 se puede observar como están distribuidos estos núcleos en la sección vertical de estos pozos del campo. Observándose que ambos solo la muestrean parcialmente, en menos de la mitad del espesor total. demarcada por la presencia de un espesor importante de lutita con una representación coherente y clara en todos los registros de pozos.
- **La parasecuencia C3D (C3D - C3E)**: tiene núcleo en 3 pozos en el campo El Furrial: P2, P1 y P3. En la Figura 5 se puede observar como están distribuidos estos núcleos en la sección vertical de cada pozo. Observándose que de estos pozos solo 2 (P2 y P1), cubren totalmente la parasecuencia aunque El P3 la cubre casi totalmente, el límite superior de la parasecuencia marca el cambio a una facies compleja con dos subconjuntos similares, con espesores diferentes, el primero de aproximadamente 20' y el segundo el complemento del espesor del transecto C3-E a C3-F, ambos granodecrecientes a la base posiblemente progradantes y obviamente regresivos forzadamente. La secuencia está acotada a la base por un amplio espesor de arenisca.
- **Parasecuencia C3C (C3C - C3D):** tiene núcleos en 2 pozos en el campo El Furrial: P2, y P3. En la Figura 5, se puede observar como están distribuidos estos núcleos en sección vertical en cada pozo, donde el P1, cubre muy poco, y el P3 cubre más de la mitad de la sección de la parasecuencia, con ninguna información hacia los límites norte y este del campo, que permita establecer variaciones de los ambientes hacia esta zona, usando datos confiables (robusta) de núcleos. definida por un nivel grueso de arenisca sin mayor presencia de limolitas, así mismo

denota un cambio local de un ambiente mayormente continental con areniscas saturadas de fluidos a otro abiertamente marino con intercalaciones entre limotas y lutitas.

- **Parasecuencia C3B (C3B - C3C):** tiene núcleo en el pozo P2. En la sección estratigráfica de la figura 5, se puede observar como están distribuidos estos núcleos en la sección vertical de esta parasecuencia. Se observa cambio en el patrón de depositación de una alternancia rítmica de areniscas y limolitas con alta frecuencia de repetición a un transecto caracterizado por paquetes bien definidos, de gran espesor y altamente contrastantes entre sí. El transecto definido entre C3-C y C3-B es claramente granodecreciente según se observa en los registros de pozos (P5).
- **Parasecuencia C3A (SBC3-C3B)**: tiene núcleos en el pozo P2. En la sección estratigráfica de la figura 5, se puede observar como están distribuidos estos núcleos en este campo, en la sección vertical de esta parasecuencia. La distribución vertical de los núcleos tomados en esta parasecuencia es muy buena, porque todos muestrearon la sección completamente. La distribución areal de los núcleos tomados, muestra que los mismos están concentrado en la parte centro – oeste del campo, está demarcada por la presencia de un espesor importante de lutita con una representación coherente y clara en todos los registros de pozos.
- **SBC3:** Límite de secuencias (SB) que acota la ventana de estudio al tope, ha sido descrita para todos los pozos como un contacto erosivo subaéreo y un punto de transición entre un ambiente típico de un sistema depositacional en alta hacia uno diferente y más continental. La superficie de erosión consta en núcleos del pozo P1.

CAPITULO IV

MARCO TEÓRICO

Este capítulo suministra la información necesaria para la comprensión de los capítulos de metodología, resultados y análisis de los mismos. Dicha información abarca fundamentalmente dos ámbitos: geológico e informático-matemático. El ámbito geológico comprende los conceptos relativos a la estratigrafía por secuencias, además de la información relativa a los registros de pozos y su interpretación petrofísica. Por otro lado el ámbito informático-computacional comprende toda la información referente a los procedimientos y mediciones geoestadísticas, así como de los procedimientos computacionales empleados como son: la minería de datos y el análisis de sensibilidad.

Con base en lo anteriormente explicado el presente capítulo se ordena así:

- Conceptos básicos de estratigrafía por secuencias
- Respuesta esperada en los diferentes registros de pozos
- Aspectos teóricos sobre Minería de Datos
- Programación lineal y análisis de sensibilidad

IV.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIA

Estratigrafía por secuencias: es la disciplina que analiza la respuesta de sedimentación a los cambios en el nivel base y los patrones depositacionales que emergen de la interacción entre el espacio disponible para la depositación y la sedimentación (Catuneanu, 2006). La estratigrafía por secuencias tiene un gran potencial para descifrar el registro geológico de la Tierra desde los cambios locales hasta los globales, así como mejorar el aspecto predictivo para la explotación y producción con fines económicos. Por estas razones, la estratigrafía por secuencias es actualmente una de las áreas de investigación más activas, tanto en el área académica como industrial.

La estratigrafía por secuencias es la más reciente revolución en el paradigma del campo de la geología sedimentaria (Catuneanu, 2006). Los conceptos que comprende esta disciplina han generado un cambio en la manera del pensamiento geológico sobre los métodos de análisis y

las facies estratigráficas. El aspecto central de la estratigrafía por secuencias es la integración de datos de diferentes disciplinas y métodos de investigación. (Véase Figura 6)

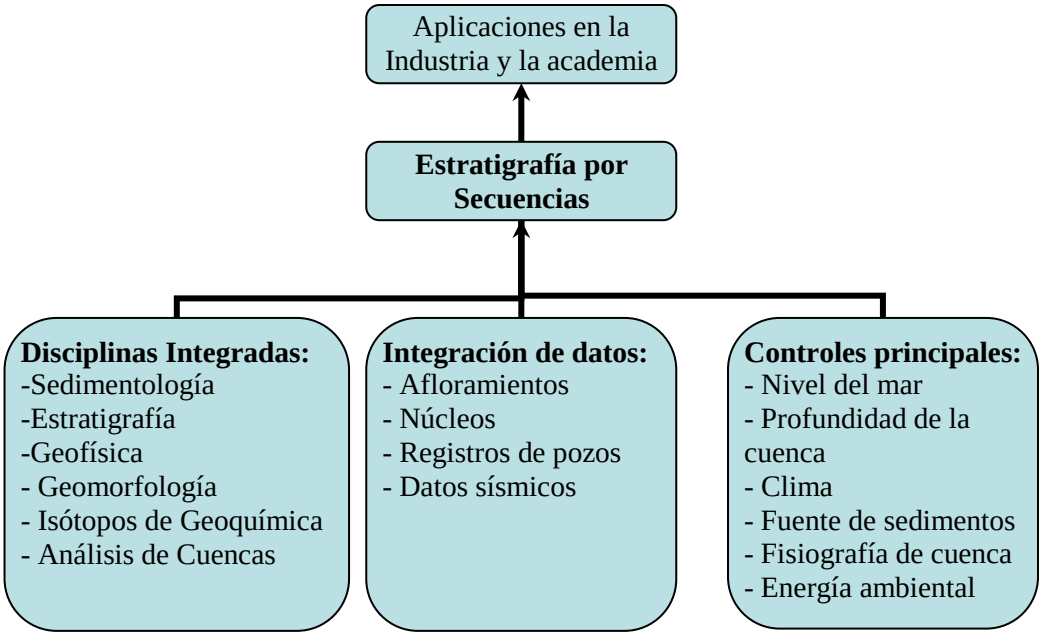


Figura 6. Integración de disciplinas y datos en la estratigrafía por secuencias (Modificado de Catuneanu, 2006)

Eustasia: Se refiere al nivel del mar global referido al centro de la tierra. Los cambios en la eustasia son globales y están asociados a un factor que los fuerza, por ej., cambios glaciales, o cambios en la circulación convectiva (Termohalina) que afecta de modo global al conjunto de las masas de agua oceánicas; variación del agua líquida en acuíferos continentales, lagos y reservorios; deformaciones de la corteza relacionadas a zonas de dispersión de las placas, subducción y colisión entre ellas, sedimentación y factores astronómicos (cambios en la excentricidad, oblicuidad, y precesión de la órbita de la Tierra). La cual puede ser representada gráficamente por medio de la Curva Global del Nivel del Mar que muestra los cambios eustáticos en el tiempo (Véase Figura 7), los cuales se ha demostrado que son cíclicos y aproximadamente regulares en el tiempo.

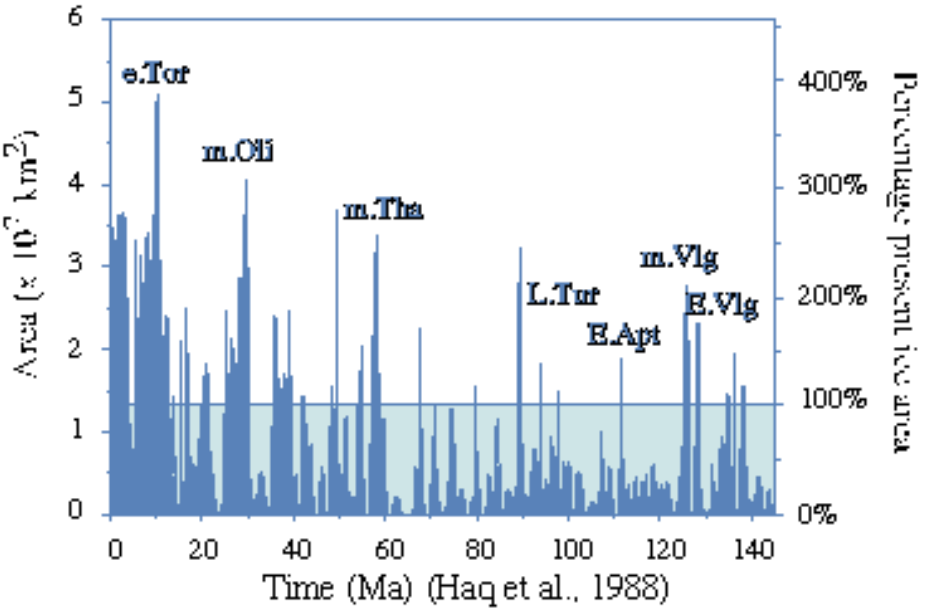


Figura 7. Cambios en el nivel eustático global del mar (Haq et al, 1988)

Nivel Relativo del Mar: Es la posición del mar con respecto a la superficie del continente; es el efecto combinado de eustasia, subsidencia de la cuenca (tectónica, carga y compactación), y aporte de sedimentos a escala local; y puede ser representada por la Curva del Nivel del Mar que presenta los cambio en el nivel del mar con respecto al tiempo

Ciclo del Nivel del Mar: Este es un periodo completo de elevación y caída del mar; estos ciclos están en función de eventos de índole diversa y tienen duración variable: Por ejemplo los ciclos de primer orden (50-300 Ma), se producen por la tectónica de placas; los ciclos de más alta frecuencia, se producen por ritmos de dispersión del piso marino, Glacio-Eustasia o factores astronómicos (Vail et al, 1977)

Los ciclos del nivel del mar tienen las siguientes duraciones:

Tabla 3. Periodo de los Ciclos del Nivel del Mar

Orden del Ciclo	**Período**
1er. Orden	50+Ma.
2do. Orden	5 a 50 Ma.
3er. Orden	0.5 a 5 Ma.
4to. Orden	0.1 a 0.5 Ma.
5to. Orden	0.01 a 0.1 Ma.
6to. Orden	<0.01 Ma.

Secuencia de primer orden: se le llama también Megasecuencia o juego de Megasecuencias. El Fanerozoico se divide en dos juegos de megasecuencias: Proterozoico Tardío- Pérmico Superior y de la base del Triásico al presente.

Secuencia de segundo orden: se le llama supersecuencia o juego de ellas. Cada una de las tres megasecuencias del Mesozoico y Cenozoico, se han dividido en 7 juegos de supersecuencias, los que inicialmente se subdividieron en 27 supersecuencias.

Secuencia de tercer orden: Esta es la unidad fundamental de la estratigrafía de secuencias, esta se reconoce en afloramientos y en el subsuelo y se refleja en la curva global del nivel del mar de Haq y otros (1988). Estas secuencias se definen por su geometría y patrones de apilamiento. De la base del Triásico al Reciente, se reconocen 120 secuencias del tercer orden.

Secuencias del cuarto orden: Tiene una ciclicidad de 100,000 a 500,000 años, tiene los mismos atributos estratales de la anterior. Grupos de secuencias de cuarto orden se apilan para formar LST, TST y HST), que se depositan entre límites de secuencia de tercer orden.

Secuencia de quinto orden: Su ciclicidad es de 10,000 a 100,000 años, se considera que están controladas por los elementos orbitales de la tierra y demás factores astronómicos.

Parasecuencia: La sucesión relativamente conformable de estratos genéticamente relacionados, limitados en la base y en la cima por MFS o sus superficies correlativas. En general una parasecuencia se someriza hacia arriba; típicamente la base de esta, es profunda y la cima, es de facies somera.

Discontinuidad de facies: Es el cambio abrupto en el ambiente depositacional, en el cual normalmente, no se encuentran dos facies adyacentes, si no que se encuentran superpuestas; esto puede indicar la presencia de una discordancia o una MFS. Por ejemplo, el límite de secuencia tipo 1, generalmente es una discontinuidad de facies, caracterizada por una somerización y la MFS se caracteriza por una profundización abrupta ascendente.

Patrones de apilamiento: Son superposiciones de parasecuencias o juegos de estas. Los tres patrones principales son: progradación, agradación y escalonamiento reverso. Véase Tabla 4.

Tabla 4. Estilos de Patrones de Apilamiento

Patrón Progradacional	En este patrón cada parasecuencia progresivamente más joven, se deposita escalonadamente mar adentro. Este patrón se produce cuando el ritmo de acomodación es menor al de depositación.
Patrón Agradacional	En este patrón cada parasecuencia progresivamente más joven, se depositan, una arriba de la otra, sin cambio lateral significante ni hacia tierra ni mar adentro. Este patrón ocurre cuando el ritmo de acomodación es aproximadamente igual al de depositación.
Escalonamiento Reverso	En este patrón los estratos cada vez más jóvenes, se superponen tierra adentro. Aunque las parasecuencias progradan y tienen somerización ascendente, el escalonamiento reverso tiene una profundización ascendente. Este ocurre cuando el ritmo de acomodación es mayor que el de depositación.

El término retrogradacional, comúnmente se usa en forma indistinta con escalonamiento reverso; sin embargo, retrogradacional se refiere a:

- Retroceso de la línea de costa en respuesta a erosión
- Progradación hacia tierra, por lo que retrogradacional no puede ser sinónimo de Escalonamiento Reverso.

Subsidencia de la cuenca: Es la cantidad que una cuenca subside en función de una fuerza tectónica, (incluyendo la contracción térmica de la litosfera), carga de sedimentos, compactación y cambios de la profundidad del agua. La subsidencia combinada con la eustasia, producen cambios relativos del nivel del mar.

Acomodación: Involucra el espacio disponible para acumulación potencial de sedimentos o el proceso de crearlo. Espacio de acomodación, se usa en lugar de acomodación de otros autores.

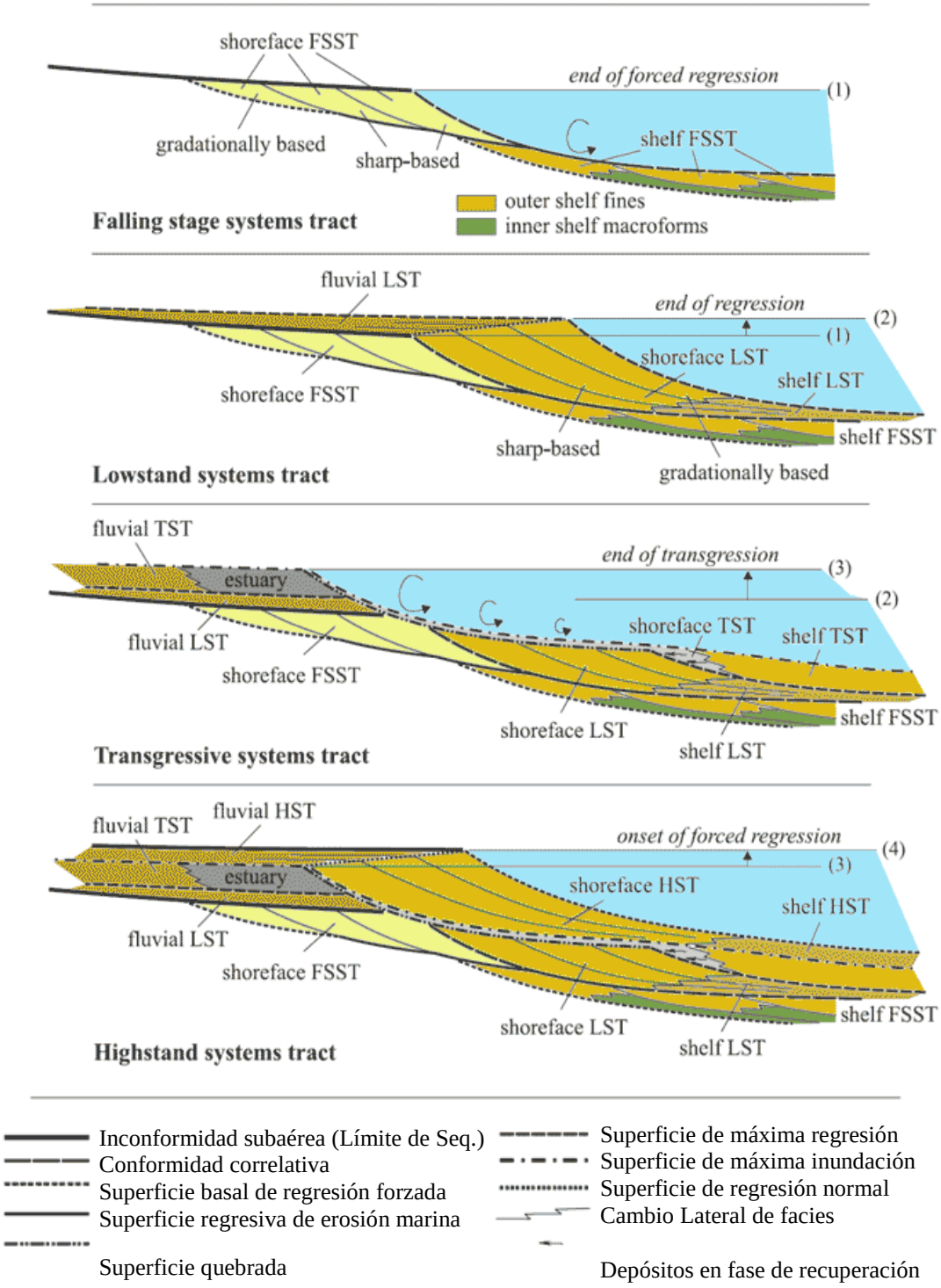


Figura 8. Superficies convencionales y sistemas depositacionales (Catuneanu, 2002)

IV.1.1. Sistemas Depositacionales

Consisten de todos los sistemas depositacionales contemporáneos que se presentan adyacentes uno de otro, depositados durante un segmento específico de la curva del nivel del mar. Se reconocen tres sistemas principales: lowstand, transgressive y highstand system tracts; y un cuarto sistema cuando se preserva un sistema de regresión forzada o "*forced regression system track"*, estos son definidos con base a los patrones de apilamiento de sus parasecuencias y combinaciones de estas, la geometría estratal de sus superficies límites y su posición dentro de la secuencia. Aunque la posición relativa de los sistemas depositacionales dentro de una secuencia depositacional permanece constante, no todos los sistemas depositacionales o partes de ellos, están presente en una secuencia dada.

A continuación se muestra en la Figura 9 la relación entre la curva del nivel relativo del mar y los sistemas depositacionales que serán definidos posteriormente.

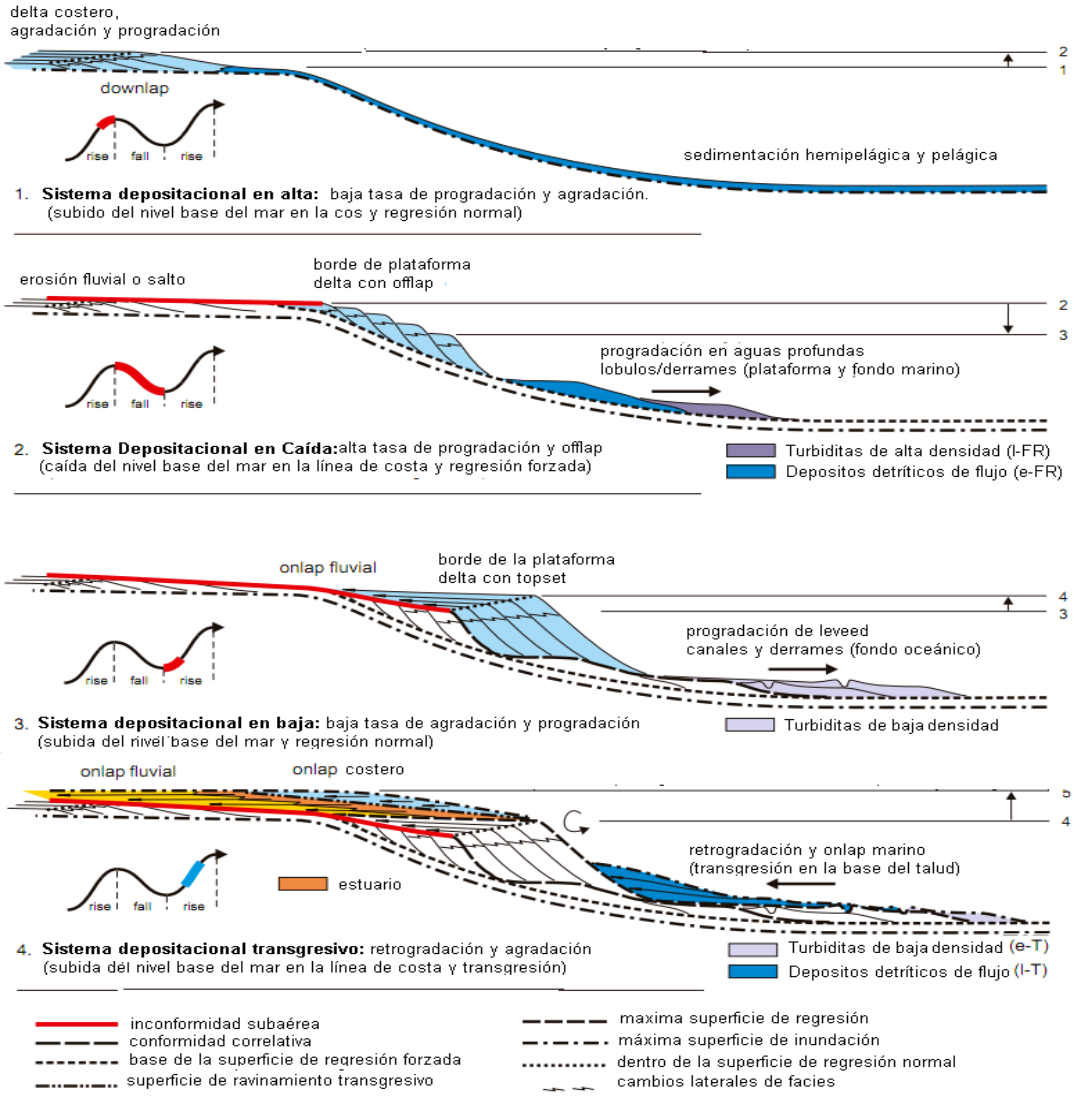


Figura 9. Relación entre los sistemas depositacionales y la curva del nivel relativo del mar (Modificado de Catuneanu, 2006)

IV.1.2. Superficies convencionales de estratigrafía por secuencias:

Los sistemas depositacionales se caracterizan por un conjunto de paquetes que se depositan en un patrón específico, cuyo material está ligado genéticamente debido al comportamiento del nivel del mar durante el período en que este se deposita. Como consecuencia los momentos máximos y mínimos del nivel base del mar, así como la relación del material sedimentado con los procesos erosivos definen una serie de superficies que describen estos momentos cumbre, en que ocurre un caso partícular que indica el instante culmen del proceso definido por el tipo de sistema encadenado.

A continuación se describen las diferentes superficies empleadas en la estratigrafía por secuencia:

Límite de Secuencia (SB): Las Secuencias Estratigráficas están comprendidas entre Límites de Secuencias (SB) que son identificadas como inconformidades erosionales y sus correspondientes conformidades correlativas. Estas superficies son producidas por la caída del Nivel del Mar que expone a las condiciones sub-aéreas los estratos previamente depositados lo que ocasiona su remoción por efecto de la erosión. Estas secuencias son diacrónicas y cortan el tope de los Sistemas Encadenados En Posición Alta (Highstand System Track, HST*)* lo que acompaña una regresión forzada.

Originalmente los límites de secuencia se clasificaban en dos Tipos I y II pero tras el trabajo de integración realizado por Posamentier y Allen, 1999 y posteriormente por Catuneanu, 2006 se propone la unificación de los dos tipos en un solo tipo unificado de límite secuencial. Esto se debe a que la diferencia fundamental entre ambos tipos de limite de secuencia es la cantidad de erosión presente, lo cual es en lo práctico muy difícil de observar en la evidencia geofísica y de campo, por lo que siendo poco práctico diferenciarlos estos autores proponen una unificación.

Superficie de Máxima Inundación (MFS): se refiere a una depositación arcillosa de gran espesor que ocurre cuando el nivel del mar ha alcanzado su máxima elevación y por tanto máxima penetración en el continente, de ahí su nombre. También marca el punto a partir del cual la tasa de elevación del nivel del mar empieza a ser superada por la tasa de depositación.

Superficie de Máxima Regresión (MRS): marca el punto de transición entre la transgresión y la regresión. Esta superficie separa las series progradan-tes inferiores (regresivas) de las series retrogradantes superiores (transgresi-vas). La MRS es generalmente concordante (conformable) con los sedimentos inferiores.

Superficie de Ravinamiento (SR): se genera por la erosión de las olas en la parte superior de la línea de costa durante una transgresión. La superficie de Ravinamiento separa las arenas de las playas y los estuarios de los materiales depositados en la zona inferior donde se encuentra la plataforma.

IV.1.3. Tipos de sistemas depositacionales:

Tal como se explicó anteriormente los sistemas depositacionales se definen en bases las caracteristicas que están ligadas a su génesis, en base al comportamiento del nivel base del mar y la tasa de erosión presente, dado que ambos conceptos están intrínsicamente ligados a los

procesos depositacionales, así como el espacio disponible para la depositación. Este último en el contexto de un margen pasivo tiene pocas variaciones, las cuales se deben principalmente a la subsidencia de la cuenca.

Falling-Stage System Track (FSST) (Sistema Depositacional en Caída)

Llamado "Abanico en Baja" por Possamentier et al, 1980 y se refiere a todos los sedimentos que se depositaron durante un proceso de regresión forzada consistiendo principalmente por facies tanto profundas como someras de sedimentos marinos, estos se acumulan al mismo tiempo que la inconformidad subaérea por lo que muchas veces este tipo de sistema depositacional no se preserva, esto se debe principalmente a la destrucción del material sedimentado tras la colmatación de la cuenca.

Highstand System Tract (HST) (Sistema Depositacional en Alta)

La relación característica que define el HST es una tasa de depositación superior a la tasa de elevación del nivel del mar, lo que redunda en un patrón agradante y progradante de generación de playas. Este sistema ocurre cuando el nivel del mar se aproxima a su máximo, dado que para esta última etapa su velocidad de elevación disminuye notablemente, lo que permite a la erosión depositar efectivamente a una tasa superior que el arrastre de sedimentos de las costas.

Un HST está acotado por su base por una superficie de máxima inundación (MFS) que representa el momento de máxima penetración del mar, momento en que la relación entre la tasa de depositación vs elevación del nivel del mar se encuentra en su mínimo, a su tope el sistema se encuentra acotado por un límite de secuencia (SB) dada la acumulación de sedimentos ocurre una exposición subaérea que marca el fin de la secuencia e inicio de una nueva.

Transgressive System Tract (TST) (Sistema Depositacional Transgresivo)

Limitado a su base por una superficie de Máxima Regresión (MRS) y a su tope por una superficie de Máxima Inundación (MFS) se refiere a todos los sedimentos depositados durante el proceso de transgresión en el que la velocidad de elevación del nivel del mar supera en gran medida la tasa de depositación, esto implica un mayor espacio en la cuenca para la depositación.

Lowstand System Tract (LST) (Sistema Depositacional en Baja)

Se refiere a todos los sedimentos depositados durante los primeros momentos de elevación del nivel del mar en una regresión, está limitado en su base por un límite de secuencias (SB) y a su tope por una Superficie de Máxima regresión (MRS).

La depositación comienza cuando la elevación del nivel del mar empieza a crear espacio para la depositación de los sedimentos, lo que implica una baja tasa de depositación en un patrón progradante y agradante a medida que ocurre el proceso.

IV.1.4. Tipos Generales de Superficies

Conformidad: Es una superficie cronoestratigráfica que separa estratos y a lo largo de ellos no hay evidencia de erosión subaérea o submarina, ni de hiato significante.

Conformidad correlativa: Conformidad que es el equivalente lateral cronoestratigráfico de una inconformidad.

Inconformidad: Superficie cronoestratigráfica que separa estratos y a lo largo de ellos se evidencia erosión o no-depósito y esto, evidencia un hiato significante. La inconformidad puede ser identificada por terminaciones estratales (p. ej. onlap, toplap), una interrupción en la sucesión bioestratigráfica o en la facies. Los depósitos de erosión y no-depósito, ocurren en cada caída global del nivel del mar, produciendo inconformidades interregionales.

Hiato: Ruptura o interrupción en la continuidad del registro geológico, debida a no-depósito, salto de sedimentos o erosión. La superficie formada durante este evento, se refiere como superficie hiatal o una inconformidad.

Salto: Transporte sedimentario a través de áreas de no depósito.

IV.2. RESPUESTA ESPERADA EN LOS DIFERENTES REGISTROS DE POZOS

IV.2.1. Contador de rayos gamma

Este instrumento realiza un conteo de la radioactividad natural de las formaciones rocosas. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla y lutitas. Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad, a menos que estén contaminadas con cenizas volcánicas o residuos de granitos.

Propiedades de los rayos gamma

Los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticas de alta energía y corta longitud de onda que son espontáneamente emitidos por algunos elementos radioactivos. Cada uno de estos elementos emite rayos gamma con una energía y número distinto, lo que permite diferencia el elemento radioactivo que los produce (potasio, torio o uranio-radio, por ejemplo) al pasar por la materia la energía y conteo puede variar debido a las colisiones de las ondas con la materia que atraviesan.

Para aplicaciones petroleras como las empleadas en el presente trabajo de investigación se utilizan las curvas **GRC** o "libres de uranio" que es simplemente una suma de los conteos de potasio (K) y torio (Th).

Interpretación de la curva GRC (Conteo libre de uranio)

La concentración promedio en la corteza terrestre para es de: 2.6% para el potasio (K), 3ppm para el uranio (U) y 12 ppm para el torio (Th), por tanto la respuesta esperada para cualquier roca sedimentaria es en promedio equivalente a la cantidad de potasio salvo algunas excepciones.

Las lutitas (arcilitas y limonitas) suelen ser mucho más ricas en minerales radioactivos que las arenas, conglomerados y calizas, por lo que una alta medida en los registros GRC implica un mayor contenido de arcilita y limonita.

Tabla 5. Factores fotoeléctricos de minerales presentes en rocas sedimentarias (Schlumberger, sin fecha)

Mineral	Factor Fotoeléctrico (PEF)
Cuarzo	1,81
Calcita	5,08
Dolomita	3,14
Feldespatos Alcalinos	2,86
Anhidrita	5,05
Sal	4,65
Caolinita	1,83
Clorita	6,31
Ilita	3,50
Montmorillonita	2,2

IV.2.2. Resistividad (ILM-ILD)

La resistividad de una formación es un parámetro importante para la interpretación, ya que se requiere para el cálculo de saturaciones (de agua o hidrocarburos) a partir de los registros básico de resistividad. Además la resistividad suele relacionarse con la porosidad para la interpretación a través de la siguiente fórmula.

$$Rwa = Rt / F \qquad (1)$$

Nota: Rwa, es un factor diagnóstico del tipo de fluido intersticial, ya que al estar corregido por la porosidad F, es mayormente sensible a la saturación de líquidos y el tipo de líquidos.

Está técnica funciona mejor en intervalos donde la resistividad del agua de la formación permanece constate o cambia sólo gradualmente. Afortunadamente, este es el caso de la mayoría de las zonas productoras de petróleo, en particular en formaciones profundas.

IV.2.3. Registros de conteo de neutrones (NPHI)

La porosidad de las rocas puede obtenerse a partir del registro sónico, el registro de densidad o el registro de neutrones, en el caso particular de los registros empleados para el presente trabajo de investigación se utilizaron los registros de neutrones para tal objetivo.

Los registros neutrónicos se utilizan principalmente para delinear formaciones porosas y para determinar su porosidad. Responden principalmente a la cantidad de hidrógeno en la formación (aún cuando estén químicamente enlazados con otros elementos en la matriz de la roca), por tanto, en formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o hidrocarburos el registro de neutrones refleja la cantidad de porosidad saturada del fluido.

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras; cada una tiene masa casi idéntica a la masa de un átomo de hidrógeno. Una fuente radioactiva en el instrumento emite neutrones lanzados a gran velocidad, la colisión causada se atenúa proporcionalmente a la cantidad de neutrones presentes, lo cual permite determinar su proporción y en función de ello la porosidad saturada. La penetración de la medida depende de la porosidad de la formación por lo que en formaciones no saturadas la resolución es máximo de un pie, la cual disminuye a medida que aumenta la saturación.

IV.2.4. Registros de densidad (RHOB)

Se basa en la medición de la densidad de la formación, por medio de la atenuaciónde rayos gamma entre una fuente y un receptor. Posee una fuente de rayos gamma, los cuales colisionan con los átomos presentes en la roca. La herramienta también posee un receptor que mide los rayos gamma dispersos liberados en las colisiones. Sirve para estimar la densidad del sistema roca – fluido (RHOB) que posteriormente servirá para calcular la porosidad por densidad (DPHI). Si el registro de densidad es bajo indica alta porosidad y si es alto indicabaja porosidad. La unidad de medida es gr/cm^3, con un rango de valores que va desde 1.96 a 2.96 gr/cm^3

Para una sustancia que consiste sólo de un elemento, el índice de densidad de electrones (ρ_e) está relacionado con la densidad total (ρ_t), tal como muestra la siguiente fórmula:

$$\rho_e = \rho_e (2Z/A) \qquad (2)$$

Nota: donde Z representa el número atómico y A el peso atómico.

IV.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS TOPES DE LUTITA POR MEDIO DE REGISTROS DE POZO

Definición de la lutita

Es una roca detrítica con clastos con un tamaño menor a 20 mm, las cuales se componen de limos y arcillas. La lutitas se componen principalmente de minerales arcillosos (grupo de la caolinita, grupo de la montmorillonita, illita), que se forman en el campo sedimentario (de neoformación) y de restos de cuarzo, feldespato (potásico y sódico) y mica (filosilicatos compuestos a su vez de metales como el hierro y el aluminio).

Expresión de la lutita en los registros de pozos (Hung, E; 1991)

Las lutitas tienen características particulares que resaltan ante los diferentes registros de pozos, a continuación se explican las expresiones que tienen las lutitas en los diferentes registros de pozos:

- **Rayos Gamma**: las lutitas poseen altas concentraciones de sales radioactivas y por lo general son mucho más radioactivas que las arenas, calizas y anhidritas.
- **Resistividad**: las lutitas tienen dentro de su red cristalina gran cantidad de moléculas de agua, tanto libre como enlazada con la estructura molecular misma de la roca. Esta estructura hidratada implica valores bajos de resistividad dadas las características del fluido.

- **Densidad y porosidad**: la lutita es un material con un tamaño de poro muy pequeño, el cual está sumamente compactado, lo cual incrementa su densidad relativa con respecto a las demás rocas sedimentarias. A pesar que los poros suelen estar aislados entre sí, lo cual limita su permeabilidad (lo que hace a la lutita un excelente sello), la roca en si misma es muy porosa pudiendo alcanzar porosidades superiores al 40% dada la estructura y empaquetamiento que tiene la lutita.

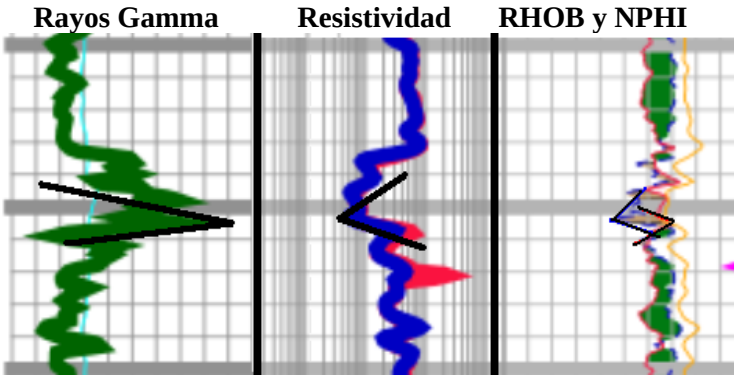


Figura 10. Contraste de los diferentes registros de pozo para un tope de lutita

En la figura anterior las formas de "V" indican la tendencia del registro en: rayos Gamma, Resistividad, Porosidad y Densidad de izquierda a derecha que se esperan para un estrato de lutita. Los vértices de estas "Vs" coinciden en profundidad y dada la concordancia de todos estos registros de pozos se puede asegurar que efectivamente se trata de una lutita. Específicamente en el gráfico de RHOB y NPHI, correspondientes con la densidad y porosidad antes mencionada, la curva de NPHI se muestra con su escala invertida para evitar solapamientos con la curva de RHOB que dificulten su observación e interpretación.

IV.3.1. Importancia de los topes de lutita como marcadores en secuencias estratigráficas

Las lutitas abarcan un área muy amplia geográficamente, lo que favores su correlación entre pozos distantes, además son definitorias como superficies de inundación.

IV.4. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE MINERÍA DE DATOS

Los pasos a seguir para la realización de un proyecto de minería de datos son siempre los mismos, independientemente de la técnica específica de extracción de conocimiento usada.

El proceso de minería de datos se compone de las siguientes fases:

Selección y pre-procesado de datos

El formato de los datos contenidos en los repositorios nunca es el idóneo y la mayoría de las veces no es posible ni siquiera utilizar ningún algoritmo de minería sobre los datos “en bruto”. Mediante el pre-procesado se filtran los datos eliminando valores incorrectos, no-válidos o desconocidos según las necesidades del algoritmo a ser utilizado.

Selección de variables

Aún después de haber sido preprocesados, en la mayoría de los casos se tiene una cantidad ingente de datos. La selección de características reduce el tamaño de los datos eligiendo las variables más influyentes en el problema, sin apenas sacrificar la calidad del modelo de conocimiento obtenido del proceso de minería.

Los métodos para la selección de características son básicamente dos:

- Aquellos basados en la elección de los mejores atributos del problema, y
- Aquellos que buscan variables independientes mediante tests de sensibilidad, algoritmos de distancia o heurísticos

Extracción de conocimiento

Mediante una técnica de minería de datos, se obtiene un modelo de conocimiento, que representa patrones de comportamiento observados en los valores de las variables del problema o relaciones de asociación entre dichas variables. También pueden usarse varias técnicas a la vez para generar distintos modelos, aunque generalmente cada técnica obliga a un preprocesado diferente de los datos.

Interpretación y evaluación

Una vez obtenido el modelo, se debe proceder a su validación comprobando que las conclusiones que arroja son válidas y suficientemente satisfactorias. En el caso de haber obtenido varios modelos mediante el uso de distintas técnicas, se deben comparar los modelos en busca de aquel que se ajuste mejor al problema. Si ninguno de los modelos alcanza los resultados esperados, debe alterarse alguno de los pasos anteriores para generar nuevos modelos.

IV.4.1. Aplicación de la minería de datos como una técnica geoestadística

Dada la técnica de minería de datos, ya explicada previamente, es fácilmente adaptable a los procesos de geoestadística, precisamente por su capacidad para el ordenamiento y la jerarquización de los datos, así como para reconocer patrones y resaltarlos con la intención de facilitar la toma de decisiones y la clasificación de los datos originales en función de los patrones observados.

La pre-selección de los datos se lleva a cabo durante la selección del área de estudio, en su ubicación geográfica y cronológica, así como en la elección de ciertos pozos, y ciertos registros de pozos, todo dirigido a tener una buena base de datos que permita una correcta toma de decisiones.

La selección de las variables implica el diseño desde el punto de vista computacional de aquellas expresiones y contenedores de datos que permitan la correcta representación de la realidad geológica. Con esto se busca representar todos los factores que son relevantes en la toma de decisiones por parte de un geólogo en la construcción de un modelo de estratigrafía por secuencias, así como distribuciones de datos que permitan la correcta representación de la realidad geológica.

La extracción del conocimiento implica obtener resultados que resalten los patrones de importancia, que sean representativos del universo de estudio, en este caso el modelo de estratigrafía por secuencia y que por tanto estos resultados numéricos sean un reflejo de un aspecto importante del problema en estudio.

Por último, tras haber resaltado los patrones de interés se procede a una evaluación, en contexto, de los resultados obtenidos, deduciendo de ellos las implicaciones geológicas pertinentes con base en todo el sistema computacional infrayacente.

IV.5. PROGRAMACIÓN LINEAL Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

IV.5.1. Programación lineal

La programación lineal es una técnica de modelado matemático que ayuda a los administradores en la planificación y en la toma de decisiones de asignación de recursos, es decir, cómo utilizarlos con la mayor eficacia posible. El enfoque básico consiste en formular un modelo matemático que represente el problema y luego analizarlo.

El interés general consiste en optimizar algo (maximizarlo o minimizarlo).

Cualquier modelo de programación lineal incluye variables de decisión, restricciones y función objetivo.

- **Variables de decisión**: lo que se quiere establecer.
- **Restricciones**: ecuaciones o desigualdades que describen la limitación de los recursos disponibles o unas condiciones específicas que deban satisfacerse (por ejemplo, si tiene que cumplirse un contrato).
- **Función objetivo**: lo que se quiere optimizar. Las situaciones que se solucionan a través de PL son aquellas que implican la maximización o la minimización de una función objetivo, teniendo en cuenta que se maximiza lo que sea conveniente para la empresa (como los ingresos y las utilidades) y se minimiza lo que no sea conveniente (como los costos).

Se llama lineal porque tanto la función objetivo como las restricciones son funciones matemáticas lineales. Por ello, la función objetivo y las restricciones deben expresarse como ecuaciones o desigualdades lineales (primer grado), o sea, de la forma $ax + by = c$.

La forma más simple de resolver un problema de programación lineal es el método gráfico; aunque éste sólo es útil cuando hay únicamente dos variables de decisión, aporta una clara ilustración sobre la manera en que están estructurados los problemas más grandes.

Cada desigualdad del sistema de restricciones determina un semiplano. El conjunto intersección de todos esos semiplanos recibe el nombre de zona factible y el vértice donde se presenta lo mejor es la solución óptima.

IV.5.2. Análisis de sensibilidad

Un modelo de programación lineal, como tal, es muy estático porque los coeficientes de las restricciones y la función objetivo asumen valores fijos. Para agregar una dimensión dinámica y aumentar la aplicabilidad en la práctica se utiliza el análisis de sensibilidad, que estudia qué tanto se ve afectada la solución óptima según los cambios que se hagan en el modelo.

- Cambios en los coeficientes de la función objetivo.
- Cambios en la disponibilidad de recursos.

Es importante considerar que los problemas reales ocurren en un ambiente cambiante, por ejemplo en la economía, estos contemplan desde la alteración de los precios de las materias primas, la demanda del producto, las capacidades de producción, etc. El análisis de sensibilidad responde a esos cambios sin requerir una solución completa del problema, en el caso particular de las ciencias geológicas estos cambios sería equivalentes a cambios en patrones de depositación, cambios en las fuentes o rocas madres, etc.

Cambios en los coeficientes de la función objetivo

Si las restricciones no varían, pero cambia la función objetivo (por ejemplo, que cambie la contribución a la utilidad de cierto producto) se modifica la pendiente de la línea de utilidad; por lo tanto, puede suceder que el punto óptimo siga siendo el mismo, pero también puede ocurrir que sea diferente; como las restricciones no se alteran, la región factible sigue siendo la misma.

La pregunta es, ¿cuánto puede cambiarse los coeficientes de la función objetivo antes de que otro punto se vuelva óptimo? Esto es posible responderlo sin necesidad de reformular y resolver nuevamente el problema gracias al análisis de sensibilidad, ya que los programas proporcionan límites permisibles (intervalos de confianza) sin que se altere la solución óptima (eso se llama rango óptimo). Si el interés recae en lo que sucedería si dos o más coeficientes de la función objetivo cambian simultáneamente debe aplicarse la regla de 100%. Dicha regla dice que “la solución óptima no varía si la suma de los porcentajes de cambio en relación al aumento o disminución permisible (según lo que ocurra) no es mayor de 100%.”

Hay que considerar que esto es cierto si se considera que todos los demás aspectos del problema original permanecen sin cambio (sólo cambia uno de los coeficientes de la función objetivo).

Cambios en la disponibilidad de recursos

En los modelos de programación lineal, las restricciones representan el uso de recursos limitados, ya sea de forma directa o indirecta. En este caso, se puede imaginar que el lado derecho de una restricción representa los límites en la disponibilidad de los recursos, por lo que un cambio en la disponibilidad de los recursos implica un cambio en las restricciones del problema.

IV.6. COMBINANDO MINERÍA DE DATOS, PROGRAMACIÓN LINEAL, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA PRODUCIR MODELOS ESTRATIGRÁFICOS CUANTITATIVOS

La función objetivo en el caso de la presente investigación es el valor de Confiabilidad, el cual se explica ampliamente en el capítulo de metodología. Este valor representa la integración de los diferentes datos para medir la confiabilidad del modelo de estratigrafía por secuencias, las restricciones y decisiones también son explicadas en el capítulo *op cit*, y están basadas en las reglas geológicas que se emplean en la interpretación del modelo, las cuales son traducidas a un sistema de programación lineal para su ejecución y computo.

El punto de referencia de todos los cálculos es precisamente el modelo original de estratigrafía por secuencias planteado por PDVSA-INTEVEP por lo que todo el sistema responde de forma directa a cualquier cambio realizado en el, por lo que en el presente trabajo especial de grado los cambios que se aplicaron en el modelo de estratigrafía por secuencias para el análisis de su sensibilidad está categorizado como cambios en los coeficientes de la función objetivo, es decir, la función de confiabilidad que depende fundamentalmente del modelo de estratigrafía por secuencias.

Adicionalmente la existencia o no de una superficie convencional de estratigrafía por secuencias en un pozo dado implica un cambio en la disponibilidad de los recursos. Sin embargo dado que la estructura de análisis de datos fue basada en la minería de datos a través de una suma ponderada, no existen umbrales de comparación más allá de la cantidad de superficies disponibles para cada pozo dado, o el ancho máximo de la ventana de confiabilidad, esto se explicará más adelante en el capítulo de metodología.

De acuerdo a sus características, las variables y parámetros utilizados son cuantitativos y se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 6. Tipos de variables empleadas en el presente trabajo de investigación

Tipo de variable	**Parámetros que corresponden con el tipo de variable**
Independientes	• Profundidad de las superficies convencionales tomadas del modelo de estratigrafía V-9 de PDVSA-INTEVEP Revisión Cretácico, 2006. • Valores de los registros de pozos, de sus diferentes fuentes.
Ingerente	• Coeficientes de minería de datos
Dependientes	• Ventana de Confianza (discreta) • Confiabilidad (continua) • Sensibilidad (continua)

CAPITULO V

MARCO METODOLÓGICO

El capítulo de metodología explica ampliamente todos los procedimientos y pasos que fueron necesarios para la consecución y conclusión de los objetivos planteados en el presente trabajo especial de grado. Se definió un orden cronológico para el presente capítulo, según el cual se busca explicar los pasos necesarios en forma secuencial. A continuación se presenta en la Figura 11 un diagrama de flujo que resume la metodología aplicada.

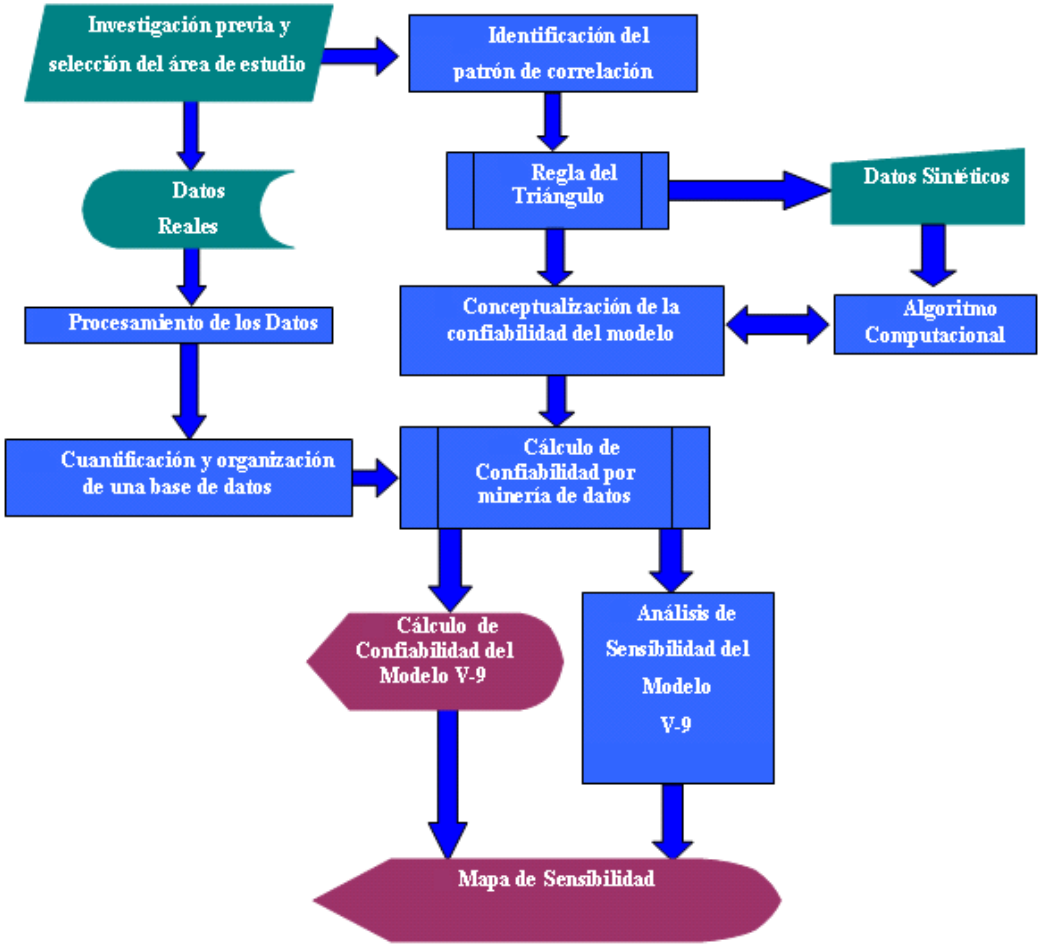


Figura 11. Diagrama de Flujo de la metodología. En color verde las entradas de datos y en morado las salidas de resultados

V.1. INVESTIGACIÓN PREVIA Y SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

En primera instancia se realizó una investigación sobre los antecedentes que pudieran aportar al presente trabajo especial de grado, en este sentido se realizó una revisión exhaustiva de los trabajos existentes en el área de estudio, entre los cuales se consideraron varios autores, entre los cuales algunos fueron descartados por diversas razones, por ejemplo, el trabajo de Di Croce (1989-1995) sobre la Cuenca Oriental de Venezuela, específicamente en la subcuenca de Maturín referido a la estratigrafía por secuencias, ya que enfocó sus estudios en la Formación San Juan, la cual está fuera de nuestra área de investigación.

Dada la disponibilidad de los datos y el interés sobre un estudio de sensibilidad se eligió un área ampliamente estudiada, con variedad de datos y más importante aun un modelo de estratigrafía por secuencias que ha sido sujeto de ajustes y actualizaciones a lo largo de los años, tal es el caso del campo El Furrial que se encuentra al norte del estado Monagas. El estudio dentro de dicha área se ha enfocado como es lógico en aquellas áreas ligadas a la explotación de hidrocarburos, entre estas áreas se eligió aquella que tuviera un contexto tectónico pasivo para el momento de su formación, además que tuviera un sistema encadenado completo y que contara con diversidad y abundancia de datos que pudieran estar disponibles, por lo que se seleccionó la sección C3, que cumple con todas las características deseadas.

El informe V-9 de PDVSA, INTEVEP (Revisión Cretácico, 2006), establece un sistema encadenado en alta (HST) para la sección C3, el cual está acotado a la base por una superficie de máxima inundación MFS y por un límite de secuencia SB a su tope. Dicho sistema encadenado está compuesto a su vez por seis (6) parasecuencias definidas por cinco (5) superficies convencionales, las cuales está correlacionadas en diversos pozos, de entre los cuales se eligieron cinco (5) específicamente por tener una gran diversidad y cantidad de datos, además de estar ubicados geográficamente en una distribución estadísticamente representativa. (Véase Figura 12)

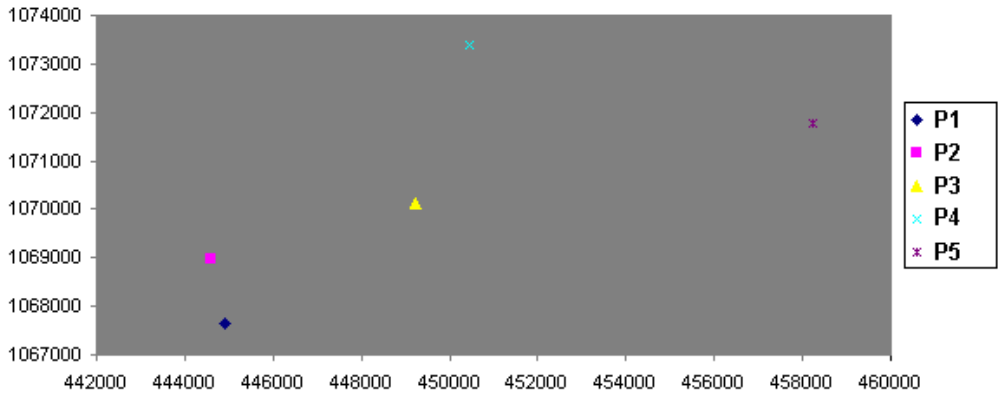


Figura 12. Distribución en planta de los pozos empleados

V.1.1. Identificación del patrón de correlación

El Informe V-9 *op cit*, establece como puntos de correlación cinco marcadores arcillosos para las parasecuencias, dada su amplia extensión geográfica, los cuales son definidos en la nomenclatura de la estratigrafía por secuencias como superficies de inundación (FS).

Dados los cambios laterales de facie, así como los cambios de ambientes para una misma parasecuencia se hizo evidente la necesidad de establecer criterios de comparación y análisis únicamente entre los topes de lutita (FS), los cuales tienen una litología específica y están correlacionados a nivel regional tal como se establece en el modelo V-9.

Los datos suministrados para el presente trabajo incluyen principalmente registros de pozo, por lo que se hizo una investigación sobre la caracterización petrofísica de las lutitas, con la intención de comprender el comportamiento de los registros de pozo, así como seleccionar entre ellos los más representativos para la identificación de los topes de lutita, como resultado se eligieron los registros de: rayos gamma GRC, resistividad profunda (ILD), densidad de neutrones (NPHI: la cual está asociada a la porosidad) y medición de densidad (RHOB); dado que con ellos se puede identificar con un alto grado de confiabilidad un tope de lutita. (Véase Figura 13)

Entre las fuentes bibliográficas estudiadas se eligió el manual de principios/aplicación de la interpretación de registros de Schlumberger (sin año) para entender cual debe ser el comportamiento esperado de los registros de pozos anteriormente mencionados en el caso de una lutita, en base a lo cual se definió un criterio de comparación por contraste, es decir el cambio relativo de los diferentes registros con respecto a las demás litologías.

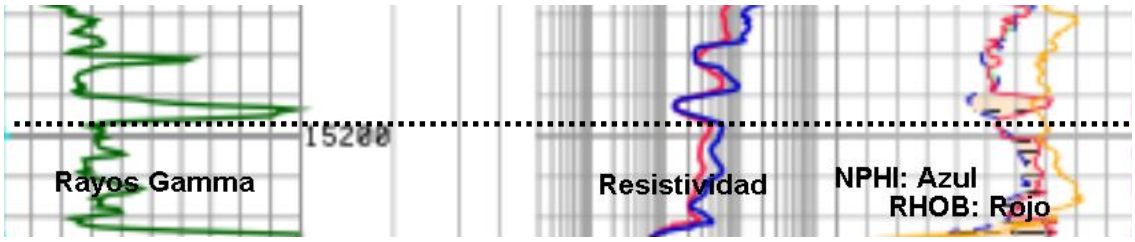


Figura 13. Patrón de una lutita vista en un registro de pozos

Tal como se observa en la imagen superior existe un patrón en la lutita que se evidencia en los registros de pozos, el cual responde como se explicó en el capítulo del marco teórico a las características físicas de la roca. Con base en este patrón se formuló un criterio o regla que representara matemáticamente y adecuadamente la realidad geológica, dicha regla se denominó en el presente trabajo *Regla del Triángulo* dado el aspecto geométrico que comparten un pico y un valle.

V.1.2. Regla del Triángulo

Se diseñó un procedimiento por medio del cual se pudieran identificar los picos/valles en los registros de pozos, y luego en base al contraste de los mismos (Véase la Figura 14)

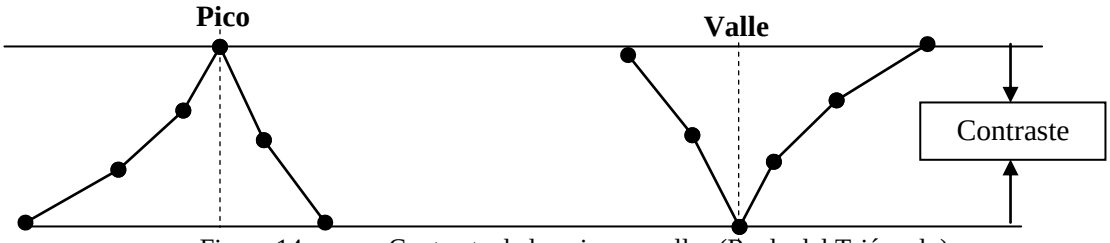


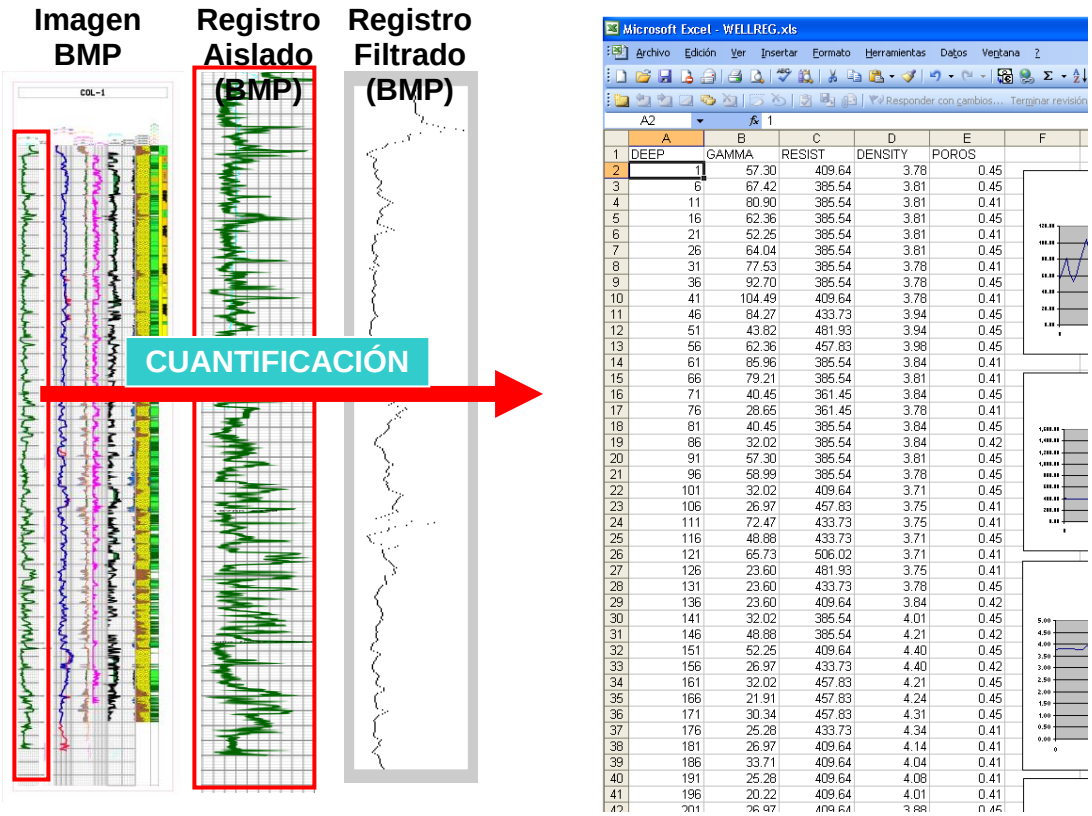
Figura 14. Contraste de los picos y valles (Regla del Triángulo)

Estrictamente un pico se define como un valor alto rodeado de un conjunto de valores que son cada vez menores a medida que se alejan de él, mientras que un valle explicado de forma análoga es un valor bajo rodeado de un conjunto de valores que aumentan a medida que se alejan de él. La altura de un pico o valle se denomina contraste y se define como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo expresada en valor absoluto, dada la construcción iterativa del código, el máximo en un pico se entiende como el valor más alto, mientras que el mínimo de un pico se refiere a el valor más bajo dentro de la secuencia descendiente, indistintamente del flanco; análogamente el mínimo en un valle es el valor más bajo, mientras que el máximo de un valle se define como el valor más alto dentro de la secuencia ascendente (Véase Figura 15)

V.2. CUANTIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE UNA BASE DE DATOS

Una de las primeras limitaciones que se enfrentó durante el desarrollo del presente trabajo era la calidad de los datos. Dado que en algunos casos no se contaba con los archivos originales, los cuales se almacenan en el formato *.LAS*, fue necesario procesar las columnas petrofísicas de registros de pozos extrayendo del formato de imagen los datos, esto implica una disminución en la cantidad de datos, así como una disminución en la calidad del registro.

Este proceso de cuantificación partió de una imagen JPG (Joint Photographic Group) la cual se exportó a un formato sin compresión de mapa de bits (BMP) el cual es matemáticamente inyectivo en su estructura interna, tal que la posición de una terna de píxeles (la cual define el color según el sistema **R**ed-**G**reen-**B**lue ó RGB) dentro del archivo corresponde con la posición de un píxel en la imagen. Cada uno de los registros de pozos se aisló en un archivo BMP aparte, el cual fue leído y filtrado para cuantificar los valores del registro de pozos, cuantificando de esta manera según la escala gráfica de la columna petrofísica el valor del registro en cada punto. (Véase la Figura 15)



	A	B	C	D	E
1	DEEP	GAMMA	RESIST	DENSITY	POROS
2	1	57.30	409.64	3.78	0.45
3	6	67.42	385.54	3.81	0.45
4	11	80.90	385.54	3.81	0.41
5	16	62.36	385.54	3.81	0.45
6	21	52.25	385.54	3.81	0.41
7	26	64.04	385.54	3.81	0.45
8	31	77.53	385.54	3.78	0.41
9	36	92.70	385.54	3.78	0.45
10	41	104.49	409.64	3.78	0.41
11	46	84.27	433.73	3.94	0.45
12	51	43.82	481.93	3.94	0.45
13	56	62.36	457.83	3.98	0.45
14	61	85.96	385.54	3.84	0.41
15	66	79.21	385.54	3.81	0.41
16	71	40.45	361.45	3.84	0.45
17	76	28.65	361.45	3.78	0.41
18	81	40.45	385.54	3.84	0.45
19	86	32.02	385.54	3.84	0.42
20	91	57.30	385.54	3.81	0.45
21	96	58.99	385.54	3.78	0.45
22	101	32.02	409.64	3.71	0.45
23	106	26.97	457.83	3.75	0.41
24	111	72.47	433.73	3.75	0.41
25	116	48.88	433.73	3.71	0.45
26	121	65.73	506.02	3.71	0.41
27	126	23.60	481.93	3.75	0.41
28	131	23.60	433.73	3.78	0.45
29	136	23.60	409.64	3.84	0.42
30	141	32.02	385.54	4.01	0.45
31	146	48.88	385.54	4.21	0.42
32	151	52.25	409.64	4.40	0.45
33	156	26.97	433.73	4.40	0.42
34	161	32.02	457.83	4.21	0.45
35	166	21.91	457.83	4.24	0.45
36	171	30.34	457.83	4.31	0.45
37	176	25.28	433.73	4.34	0.41
38	181	26.97	409.64	4.14	0.41
39	186	33.71	409.64	4.04	0.41
40	191	25.28	409.64	4.08	0.41
41	196	20.22	409.64	4.01	0.41
42	201	26.97	409.64	3.88	0.45

Figura 15. Cuantificación de la columna estratigráfica

La primera limitación de este método es que como máximo se puede adquirir un dato por cada píxel, lo cual además no es siempre posible por la interferencia entre el color del registro y los demás colores presentes en la imagen, además es necesario muestrear de forma homogénea los diferentes registros para cada pozo, razón por lo cual se emplea la mínima resolución entre los registros asociados a cada pozo, definida como un dato cada tres píxeles (Véase la Figura16). Se realizaron diversas pruebas con la finalidad de garantizar que no hubiese diferencias significativas en cuanto a las distancias entre píxeles, y se constato la independencia del modelo a esta distancia.

COTA	GAMMA	RESIST	DENSIDAD	POROSIDAD
18.001	55,62	1.213,48	2,37	0,37
18.004	33,71	1.235,96	2,06	0,38
18.007	26,97	1.235,96	2,10	0,36
18.010	23,60	1.213,48	2,06	0,37
18.013	23,60	1.213,48	2,12	0,37
18.016	25,28	1.303,37	2,18	0,37
18.019	30,34	1.303,37	2,00	0,37
18.022	26,97	1.280,90	2,00	0,37
18.025	28,65	1.280,90	2,04	0,37
18.028	25,28	1.213,48	2,02	0,36
18.031	20,22	1.123,60	2,04	0,36
18.034	26,97	1.146,07	2,04	0,37
18.037	13,48	1.101,12	2,06	0,37
18.041	42,13	1.011,24	2,00	0,37
18.044	33,71	1.101,12	2,04	0,37
18.047	37,08	1.213,48	2,20	0,37
18.050	35,39	1.258,43	2,10	0,37
18.053	64,04	1.280,90	2,06	0,37
18.056	35,39	1.280,90	2,02	0,37

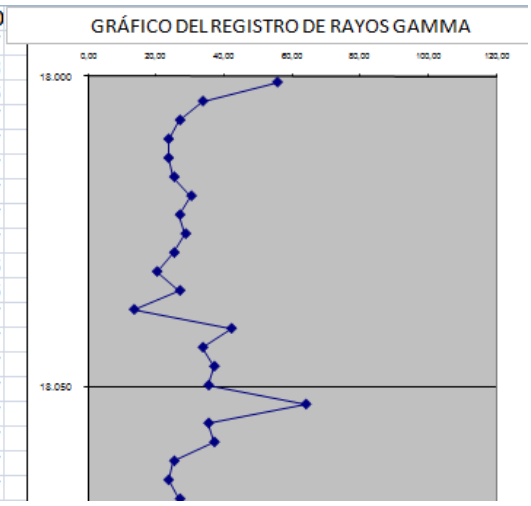


Figura 16. Ejemplo de un registro cuantificado

Con base en los datos anteriormente mencionados se construyeron un conjunto de hojas de cálculo, donde cada una contiene los registros de cada pozo organizados por columnas y donde las filas corresponden con la profundidad en que fueron muestreados esos valores, en total se generaron cinco hojas de cálculo, una por cada pozo. Adicionalmente se construyó una sexta hoja de cálculo contentiva del modelo cuantitativo de estratigrafía por secuencias creado a partir del modelo planteado en el Informe V-9 PDVSA, INTEVEP *op cit*, dicha hoja de cálculo cuenta con una columna por cada pozo, una superficie convencional (tope de lutita) por cada fila y en el intercepto fila/columna se expresa la profundidad en la cual para dicho pozo se encontró la respectiva superficie convencional, según el modelo de estratigrafía por secuencia del Informe V-9 PDVSA, INTEVEP *op cit*.

V.3. DATOS SINTÉTICOS

Una vez definidos los criterios que representaban matemáticamente la realidad geológica del modelo de estratigrafía por secuencias se diseñó un algoritmo que computara de forma automática la Confiabilidad de cualquier modelo propuesto según los datos de los registros de pozos. El primer paso en el desarrollo del algoritmo computacional se hizo en base a un conjunto de datos sintéticos idealizados organizados en una estructura idéntica a la de los datos reales anteriormente mencionados, la intención era verificar que los valores de confiabilidad estaban normalizados, que el valor de la confiabilidad es coherente con la suma ponderada de los contrastes, así como que los coeficientes mostraban la tendencia esperada en función de los contrastes establecidos en los datos sintéticos y que efectivamente el análisis de sensibilidad realizaba ajustes coherentes con el esperado, dentro de la ventana de confiabilidad establecida por el ancho máximo de los picos/valles.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de datos sintéticos acompañado de una columna de datos normalizados [0,1] tal como se explicó anteriormente. (Véase Figura 18)

PROFUND	GAMMA		RESISTIV		DENSIDAD		POROSIDAD	
10000	80	**0.53**	1000	**0.50**	2.5	**0.60**	0.3	**0.50**
10003	80	**0.53**	1000	**0.50**	2.5	**0.60**	0.3	**0.50**
10006	85	**0.57**	950	**0.48**	2.6	**0.70**	0.25	**0.33**
10009	90	**0.60**	900	**0.45**	2.65	**0.75**	0.22	**0.23**
10012	95	**0.63**	850	**0.43**	2.7	**0.80**	0.2	**0.17**
10015	90	**0.60**	900	**0.45**	2.65	**0.75**	0.22	**0.23**
10018	85	**0.57**	950	**0.48**	2.6	**0.70**	0.25	**0.33**
10021	80	**0.53**	1000	**0.50**	2.5	**0.60**	0.3	**0.50**
10024	80	**0.53**	1000	**0.50**	2.5	**0.60**	0.3	**0.50**

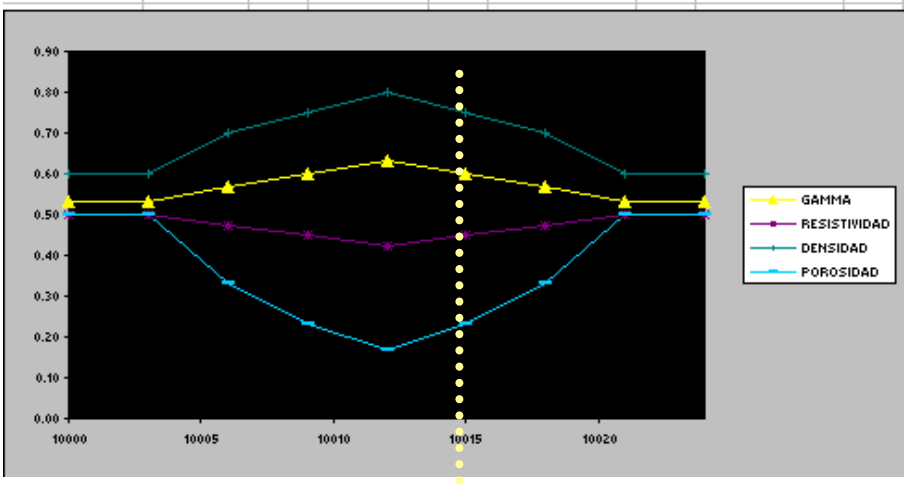


Figura 17. Datos sintéticos para un estrato de lutita. La línea pespunteada vertical de color amarillo claro muestra el punto exacto donde debe pasar la superficie convencional (10012')

V.3.1. Diseño de un algoritmo para el cálculo de la confiabilidad del modelo

Se procedió al diseño de un algoritmo que empleando la herramienta computacional permitiese el cálculo de la confiabilidad del modelo cuantificado de estratigrafía por secuencias, el cual se encuentra en el Anexo I del presente trabajo especial de grado

V.4. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS

Una vez determinada la cantidad y calidad de los datos, habiéndolos organizado y teniendo claro el criterio de correlación que se empleó en la construcción del modelo V-9 se procedió a diseñar un criterio que definiera el concepto de confiabilidad, de forma que tuviera tanto un sentido geológico práctico, como una expresión matemática que la computadora pudiera analizar. En este sentido la primera decisión fue definir el concepto de confiabilidad, por tanto se definió un criterio matemático que representara adecuadamente la realidad.

Desde el punto de vista geológico es necesario colocar la profundidad exacta del punto medio del tope de lutita como el punto marcador de la superficie convencional, así mismo es necesario que efectivamente el marcador esté colocado efectivamente sobre una lutita cuando se refiere a un FS, es decir, que este sobre el pico/valle respectivo del registro de pozo. De haber varios picos posibles, se debe colocar el marcador sobre el punto donde los contrastes integrados de los diferentes registros de pozos sean más coherentes entre sí, donde sean más claros y por tanto más **Confiables,** dada la complejidad que esto representa se utilizó un procedimiento de minería de datos (el cual se explicará más adelante) para cuantificar la relevancia de cada registro de pozo en el modelo de estudio, para luego hacer una aplicación de pesos mediante una suma ponderada de los contrastes en función de dicho coeficiente de relevancia. (Véase Ecuación 3)

$$\text{Confiabilidad} = GRC_C \times Coef_{GRC} + C_{LMD} \times Coef_{LMD} + C_{NPHI} \times Coef_{NPHI} + C_{RHOB} \times Coef_{RHOB} \qquad (3)$$

Donde:

C: es el contraste del registro de pozo (adimensional)

Coeficiente: indica el grado de relevancia para dicho registro de pozo (adimensional)

V.4.1. Minería de datos y cálculo de confiabilidad

Se calcularon los contrastes de los picos y valles de los respectivos registros de pozos, asumiendo que el centro del pico/valle corresponde con la profundidad exacta expresada en el modelo cuantitativo de estratigrafía por secuencias.

Tal como se explicó anteriormente se organizó una base de datos que cuantificó el modelo de estratigrafía por secuencias, almacenando los valores de profundidad de cada superficie, dentro de cada pozo. De acuerdo a los criterios de estratigrafía por secuencias comúnmente aceptados la superficie convencional (en este caso una FS) debe pasar por el medio del estrato de lutita, lo que corresponde con el punto de mayor contraste para los diferentes picos/valles, es a partir de esta profundidad que se observó de forma iterativa la tendencia hasta ascendente para los valles y descendente para los picos, terminado el ciclo iterativo cuando dicha tendencia cambiase, tomando como valor del contraste la mayor diferencia entre el centro del pico/valle y el valor extremo del flanco más distante verticalmente. Véase Figura 17.

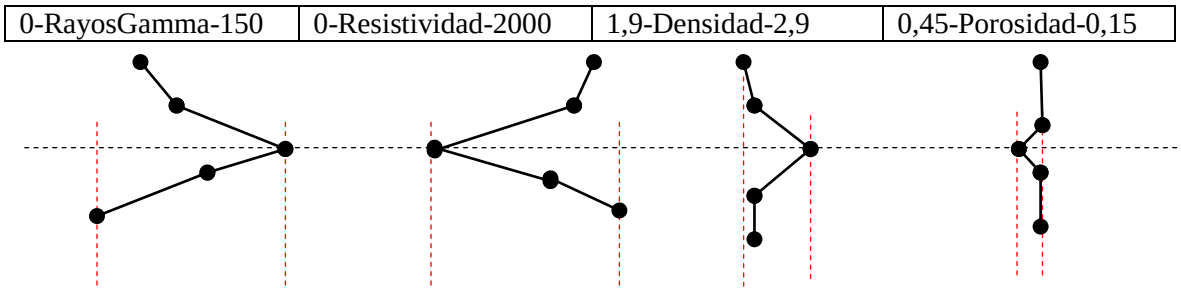


Figura 18. Contraste de los diferentes registros de pozo para un tope de lutita

Los contrastes fueron convertidos a una escala de 0 a 1, dividiendo cada contraste entre el máximo de la escala de cada registro de pozo, en el caso de GRC y ILD dado que la escala natural de dichos registros comienza en 0 y progresa linealmente hasta su máximo, y se aplicó una fórmula de reducción para los valores de NPHI y RHOB, cuya escala comienza en un número distinto a 0, y luego progresa linealmente. (Véase Ecuación 4).

Este procedimiento permite comparar los valores de los registros entre sí, al determinar sus variaciones relativas.

$$\frac{Contraste_{registro}(pozo, \sup erficie)}{Escala_{registro}} = [0,1] \qquad (4)$$

Escala$_{registro}$:

*150 API para el GRC

*2000 Ω.m para ILD

*X-1,9 g/cm^3 para la densidad

*(X-0,15)/0,30 %/100 para la porosidad.

Adquisición con escala invertida del registro de NPHI

Nótese de la conversión de escala expresada en la figura anterior que el valor del registro NPHI fue invertido con el propósito de simplificar su adquisición durante la cuantificación del mismo, dicha conversión coloca el límite inferior de la escala a la izquierda (0,15) y el límite superior de la misma a la derecha (0,45) de manera que hubiese una relación directamente proporcional entre el alejamiento horizontal en el gráfico con respecto a la medida del registro. La implicación más directa de esta inversión es que el registro de NPHI mostrará un "valle" para valores altos de porosidad, mientras que denotará un "pico" para los valores bajos. Esta adquisición con escala invertida simplificó enormemente las operaciones matemáticas y el algoritmo.

Cálculo del coeficiente de Relevancia

Luego se procedió a sumar todos los contrastes de rayos gamma de cada pozo y superficie, así mismo los de resistividad en otra variable, y así sucesivamente con todos los demás registros de pozos. La comparación entre los valores acumulados de los contrastes de cada tipo de registro, permite conocer la relevancia de dicho tipo de registro en la caracterización de los topes de lutita, para llevar dichos valores de relevancia a una escala estándar de 0-1 se divide el valor acumulado en cada variable entre el total de los acumulados (Véase Ecuación 5)

$$Relevancia_{registro} = \frac{\sum Contrastes_{registro}\,(pozo, superficie)}{Total_{contrastes}} \qquad (5)$$

Posteriormente se divide este valor obtenido para cada tipo de registro entre el mínimo de entre dichos valores para obtener un coeficiente proporcional (Véase Ecuación 6) que permita posteriormente una suma ponderada que integre los contraste de los registros en un valor único que se denomina *"Confiabilidad".* (Véase Ecuación 3)

$$\mathrm{Coeficiente}_{\mathrm{registro}} = \frac{\mathrm{Relevancia}_{\mathrm{registro}}}{\mathrm{Minimo}\left(\mathrm{Contraste}_{\mathrm{registro1}}, \mathrm{Contraste}_{\mathrm{registro2}}, \ldots, \mathrm{Contraste}_{\mathrm{registro3}}\right)} \qquad (6)$$

El procedimiento anteriormente explicado corresponde con una Minería de Datos, la cual resalta el contraste de forma proporcional a la relevancia de cada registro de pozo, esto implica que el registro más contrastante y característico para identificar los topes de lutitas tendrá un coeficiente mayor y por tanto será más relevante en el aporte al valor de confiabilidad.

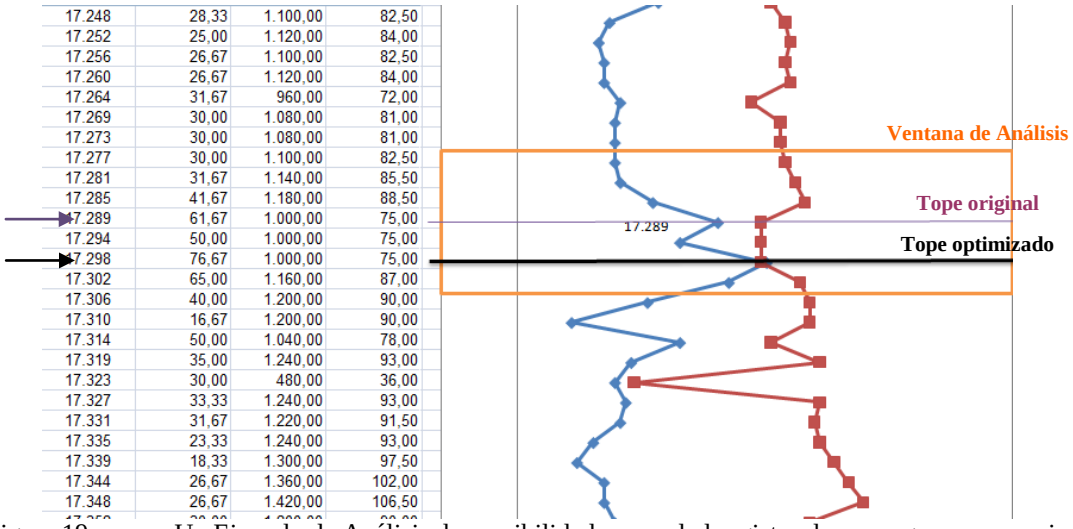
Este cálculo de confiabilidad del modelo original es el punto de referencia con respecto al cual se realizará posteriormente el análisis de sensibilidad, por lo que puede tener inexactitudes que luego serán medidas y ponderadas con los criterios de dicho análisis.

V.5. CÁLCULO DE CONFIABILIDAD DEL MODELO V-9

En el modelo V-9 se establece la profundidad específica de cada una de las superficies convencionales que componen el mismo, tal como se explicó en el apartado de Cuantificación del presente capítulo. Con base en estas profundidades se procedió a evaluar: si los registros de pozos tenían un contraste típico de un tope de lutita en el punto exacto donde se determinó la profundidad, en caso de que ninguno de los registros de pozos tuviera un máximo o mínimo respectivamente, que indicada un posible tope de lutita la confiabilidad de ese punto sería 0, mientras que si algunos de los registros muestra algún contraste coherente con el patrón deseado entonces la confiabilidad sería distinta de 0. El valor específico de la confiabilidad para cada caso se calculó aplicando el procedimiento anteriormente explicado para cada una de las superficies convencionales indicadas para cada pozo, lo cual dio como resultado un valor de confiabilidad de cada superficie y pozo. Durante este procedimiento también se midió el ancho de los picos/valles de los registros de pozos para definir con este valor la ventana de confiabilidad del análisis de confiabilidad que se explicará más adelante.

V.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Un análisis de sensibilidad consiste en un estudio de las consecuencias que ocurren en los resultados de un sistema cuando se hacen pequeños cambios graduales a los datos que son procesados por dicho sistema, tal como se explicó en el capítulo II. En el presente estudio se realizaron pequeños cambios en la profundidad de las diferentes superficies convencionales del modelo de estratigrafía por secuencias, con base en el modelo V-9 y variando la superficie en una cantidad no mayor al ancho del pico/valle más explayado, esto garantiza que el contexto geológico se mantiene, estableciendo por tanto una ventana de confiabilidad adecuada y estrecha que permite afirmar que las reglas del sistema se mantienen.



17.248	28,33	1.100,00	82,50
17.252	25,00	1.120,00	84,00
17.256	26,67	1.100,00	82,50
17.260	26,67	1.120,00	84,00
17.264	31,67	960,00	72,00
17.269	30,00	1.080,00	81,00
17.273	30,00	1.080,00	81,00
17.277	30,00	1.100,00	82,50
17.281	31,67	1.140,00	85,50
17.285	41,67	1.180,00	88,50
17.289	61,67	1.000,00	75,00
17.294	50,00	1.000,00	75,00
17.298	76,67	1.000,00	75,00
17.302	65,00	1.160,00	87,00
17.306	40,00	1.200,00	90,00
17.310	16,67	1.200,00	90,00
17.314	50,00	1.040,00	78,00
17.319	35,00	1.240,00	93,00
17.323	30,00	480,00	36,00
17.327	33,33	1.240,00	93,00
17.331	31,67	1.220,00	91,50
17.335	23,33	1.240,00	93,00
17.339	18,33	1.300,00	97,50
17.344	26,67	1.360,00	102,00
17.348	26,67	1.420,00	106,50

Figura 19. Un Ejemplo de Análisis de sensibilidad: en azul el registro de rayos gamma, en rojo superpuesto el registro de resistividad para este pozo P5

Tal como se explicó previamente en el presente capítulo, la correlación en un modelo de estratigrafía por secuencias se establece por los topes de lutita, más no por las litologías entre ellos, es por esto que se desea mantener una ventana de confiabilidad estrecha que garantice que la comparación se realizó con respecto a un punto cercano al establecido en la correlación, lo cual garantiza que la correlación sigue siendo la misma por considerarse “pequeñas” las fluctuaciones. (Véase Figura 19)

Para cada cambio en la profundidad de las superficies que definen el modelo de estratigrafía por secuencias se calculó la Confiabilidad de cada caso, la cual se comparó con el valor previo, el cual originalmente corresponde con el valor de Confiabilidad del Modelo V-9, cada vez que una nueva Confiabilidad es calculada se compara con la anterior y si la nueva es mayor entonces se almacena.

Al final del ciclo iterativo este procedimiento garantiza la máxima Confiabilidad para cada superficie dentro del modelo, es decir una profundidad muy cercana a la original (o igual si el modelo era originalmente muy preciso) la cual cuenta con la mejor combinación posible entre los contrastes de los registros de pozos (Véase Ecuación 3)

V.7. MAPA DE SENSIBILIDAD

Posteriormente, una vez obtenido el modelo estratigráfico calculado a través del estudio de sensibilidad, se calcula la diferencia de confiabilidad entre este y el modelo original (Véase Ecuación 7)

$$Confiabilidad_{residual} = Confiabilidad_{sensibilidad} - Confiabilidad_{original} \qquad (7)$$

Dicha confiabilidad residual indica la sensibilidad del modelo INTEVEP, dado que siendo las variaciones iguales para todos los pozos y superficies, un cambio significativo en la confiabilidad es indicador de imprecisiones que tienen de hecho un fuerte impacto sobre el modelo ya que incluso podrían haber varios metros de diferencia que redundan en cantidades importantes de volumen, dada la enorme distancia que existe entre los pozos. La presentación de los resultados se realizó individualmente para cada superficie, en forma de un gráfico de barras y de un mapa, de manera de mostrar cual es la confiabilidad residual para todos los pozos donde aparece dicha superficie, lo cual generó por tanto un mapa de sensibilidad por cada superficie. (Véase Figura 20)

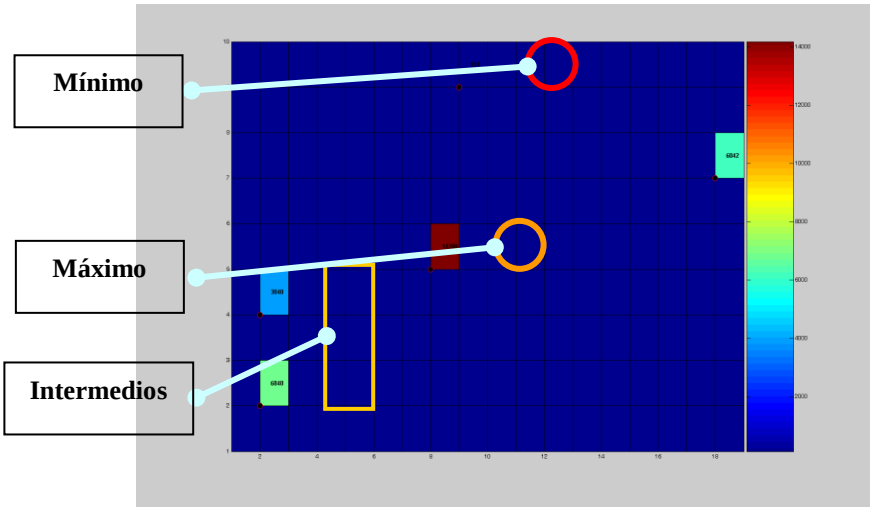


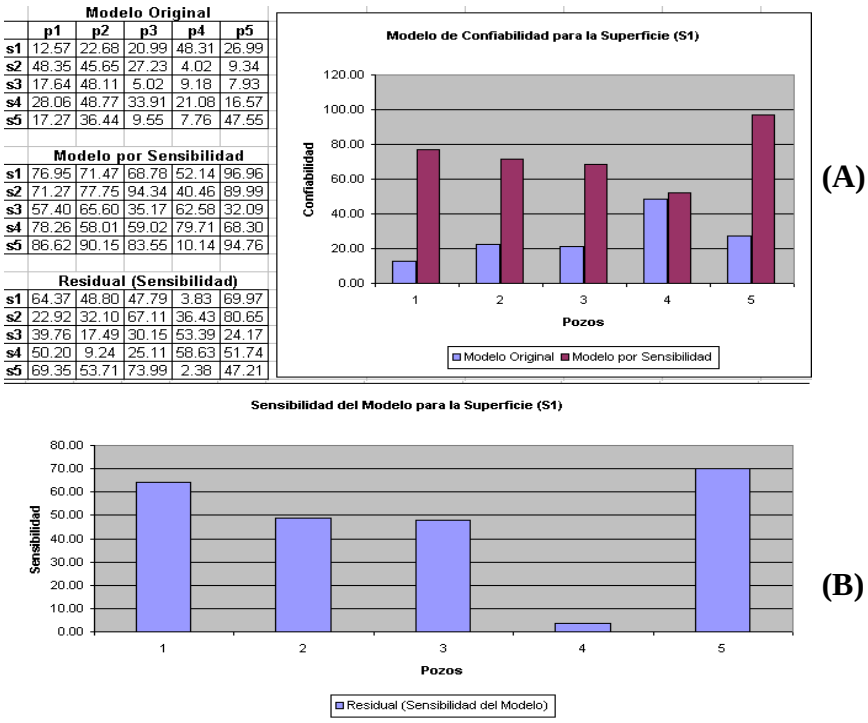
Figura 20. Ejemplo de un mapa de sensibilidad. La posición de los picos corresponde con la de los pozos en UTM y su altura a la sensibilidad de una superficie dada

En la figura anterior (Figura 20) se observan tres elementos que resaltan ciertos puntos en el mapa, los cuales corresponden de la siguiente manera: círculo rojo envuelve al pozo de menor sensibilidad, el círculo anaranjado envuelve el pozo de mayor sensibilidad y el cuadrado amarillo a dos pozos que tienen valores intermedios entre los extremos anteriormente mencionados. A la derecha de la imagen se observa una barra de color que muestra la escala de colores que expresa la sensibilidad relativa entre los pozos.

Un color relativamente más caliente (alto en la escala) implica una sensibilidad mayor, mientras que un valor más frío (bajo en la escala) implica una sensibilidad menor. La escala de color se genera con base a la dispersión de los datos, representando los valores relativamente más altos con el color más caliente, mientras más lejano esté dicho valor del promedio de los datos, más caliente será el color que lo represente, así mismo funciona de forma análoga con los colores fríos.

Una distribución de colores cercanos al centro de la escala implica valores de sensibilidad semejantes, mientras que una distribución de colores diversos implica una alta dispersión en el conjunto de las sensibilidades.

En la figura 21, (A) indica los valores de confiabilidad de un modelo hipotético (barras azules), luego los valores de confiabilidad para el modelo ajustado por sensibilidad (barras moradas) y por último la diferencia entre ellos en (B) donde se ilustra la diferencia entre el modelo original y el modelo de sensibilidad ajustado para cada uno de los pozos.



Modelo Original	p1	p2	p3	p4	p5
s1	12.57	22.68	20.99	48.31	26.99
s2	48.35	45.65	27.23	4.02	9.34
s3	17.64	48.11	5.02	9.18	7.93
s4	28.06	48.77	33.91	21.08	16.57
s5	17.27	36.44	9.55	7.76	47.55

Modelo por Sensibilidad					
s1	76.95	71.47	68.78	52.14	96.96
s2	71.27	77.75	94.34	40.46	89.99
s3	57.40	65.60	35.17	62.58	32.09
s4	78.26	58.01	59.02	79.71	68.30
s5	86.62	90.15	83.55	10.14	94.76

Residual (Sensibilidad)					
s1	64.37	48.80	47.79	3.83	69.97
s2	22.92	32.10	67.11	36.43	80.65
s3	39.76	17.49	30.15	53.39	24.17
s4	50.20	9.24	25.11	58.63	51.74
s5	69.35	53.71	73.99	2.38	47.21

Figura 21. Modelo de Sensibilidad

CAPITULO VI

RESULTADOS

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos durante el análisis de sensibilidad y minería de datos realizo al modelo de estratigrafía por secuencias del Modelo Estratigráfico V-9 hecho por Rondón et al, en PDVSA-INTEVEP. Dichos resultados son presentados de forma esquemática y en concordancia con el capítulo de metodología.

VI.1. INVESTIGACIÓN PREVIA Y SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

La siguiente figura representa una sección estratigráfica con una orientación SO-NE donde se aprecian los diferentes pozos que fueron objeto de estudio en el presente trabajo de investigación, denominados: P1, P2, P3, P4 y P5. En la dirección vertical se pueden observan dentro de la figura una serie de líneas que conectan los perfiles de cada uno de los pozos, dicha líneas representan las diferentes superficies convencionales de estratigrafía por secuencias que se estudiaron en este trabajo especial de grado.

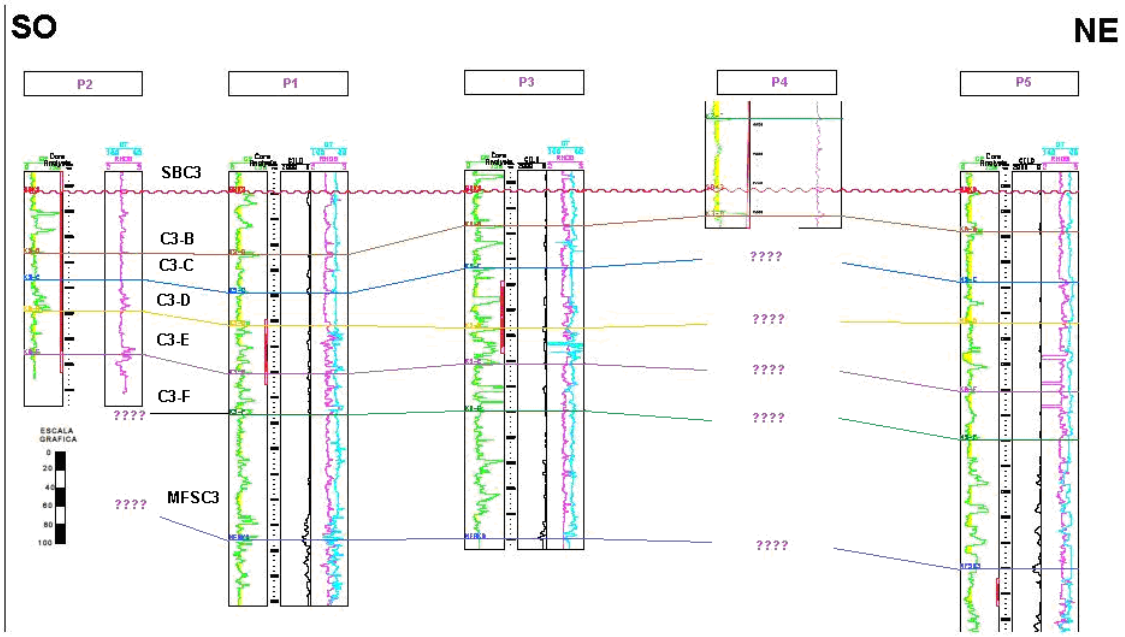


Figura 22. Modelo de secuencias estratigráficas del campo "El Furrial"

Dado que las superficies de correlación más importantes son precisamente el límite de secuencia y la superficie de máxima inundación que acotan el sistema en tope y base,

respectivamente, dichas superficies se mantuvieron fijas, por lo que sólo se realizó el análisis de sensibilidad con las superficies de inundación (FS) comprendidas entre ambas.

VI.2. CUANTIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE UNA BASE DE DATOS

Tras una revisión visual se determinaron las profundidades de corte entre las diferentes superficies convencionales del modelo y los distintos pozos, con ello se obtuvo la Tabla 8, la cual contiene esta información en el intercepto respectivo entre cada superficie y pozo. Adicionalmente se realizó la cuantificación de los registros de pozos partiendo de las columnas gráficas que fueron insumo para el presente trabajo especial de grado, las cuales se encuentran en el Anexo II del presente documento.

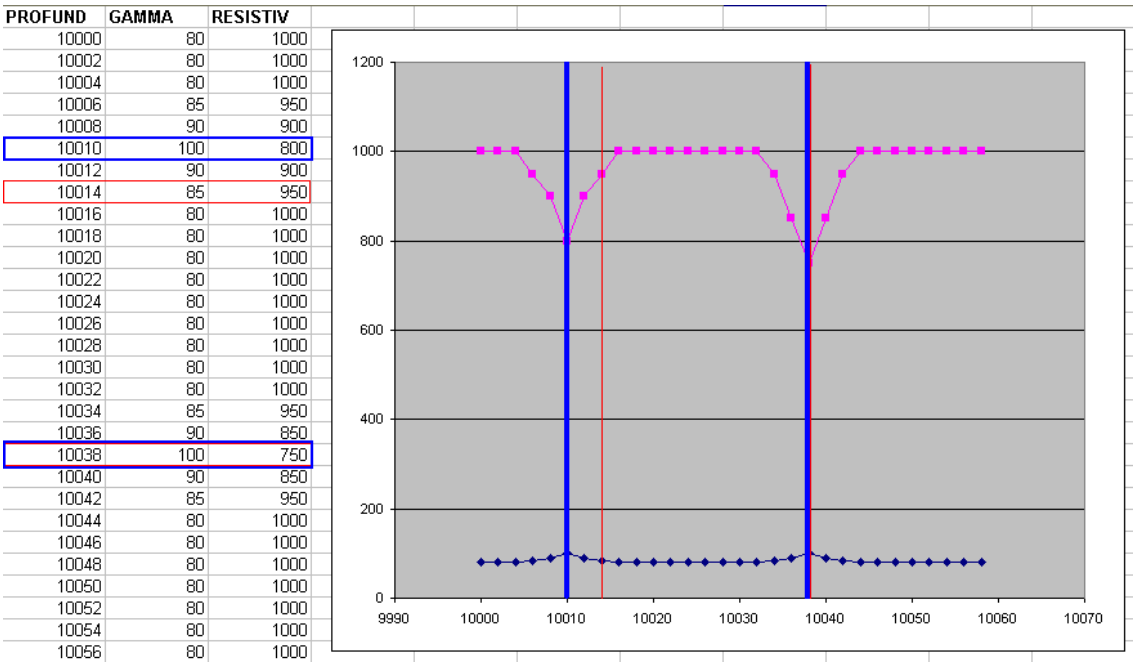
Tabla 7. Modelo numérico de estratigrafía por secuencias V-9

SECUENCIA C3

	P1	P2	P3	P4	P5
SBC3	14701	15562	15117	18130	17210
C3-B	14820	15681	15188	18190	17290
C3-C	14895	15733	15270	0	17390
C3-D	14959	15800	15385	0	17470
C3-E	15055	15880	15455	0	17605
C3-F	15132	0	15550	0	17700
MFSC3	15380	0	15800	0	17950

VI.3. DATOS SINTÉTICOS

Para el diseño del algoritmo fue necesaria la utilización de datos control, que de manera idealizada representaran el comportamiento esperado de los topes de lutita en los diferentes registros de pozos, para efectos de esta prueba idealizada se utilizaron únicamente unos datos que simulaban el registro de rayos gamma y el registro de resistividad, los cuales se pueden apreciar en la siguiente Figura 23, en color azul y rosado respectivamente. La figura 23 tiene tanto una tabla donde se expresan numéricamente los valores sintéticos y una gráfica que muestra los mismos. La línea vertical de color azul representa el ajuste hecho por el algoritmo tras el análisis de sensibilidad y la línea roja vertical el valor de la profundidad para esta superficie convencional hipotética antes de dicho análisis de sensibilidad, es decir la que correspondería con el modelo original.



PROFUND	GAMMA	RESISTIV
10000	80	1000
10002	80	1000
10004	80	1000
10006	85	950
10008	90	900
10010	100	800
10012	90	900
10014	85	950
10016	80	1000
10018	80	1000
10020	80	1000
10022	80	1000
10024	80	1000
10026	80	1000
10028	80	1000
10030	80	1000
10032	80	1000
10034	85	950
10036	90	850
10038	100	750
10040	90	850
10042	85	950
10044	80	1000
10046	80	1000
10048	80	1000
10050	80	1000
10052	80	1000
10054	80	1000
10056	80	1000

Figura 23. Análisis de sensibilidad de los datos sintéticos

VI.4. COEFICIENTES APRENDIDOS POR MINERÍA DE DATOS

La siguiente tabla contiene los coeficientes de minería de datos, los cuales se obtuvieron tal como se describe detalladamente el capítulo de metodología, midiendo los contrastes normalizados para cada uno de los registros de pozos a lo largo de todo el modelo, los coeficientes que se muestran a continuación expresan la relación entre los contrastes normalizados para cada uno de los registros de pozos, dichos coeficientes permiten conocer la relevancia de de los diferentes registros de pozos para determinar la confiabilidad de un tope de lutita.

Tabla 8. Coeficientes aprendidos por minería de datos

	Rayos Gamma	**Resistividad**	**Densidad**	**Porosidad**
Coeficientes	2.6742	1	3.2370	1.5423

Tal como se explicó anteriormente los coeficientes obtenidos por el procedimiento de minería de datos son adimensionales y representan una constante de proporcionalidad para sus aplicaciones.

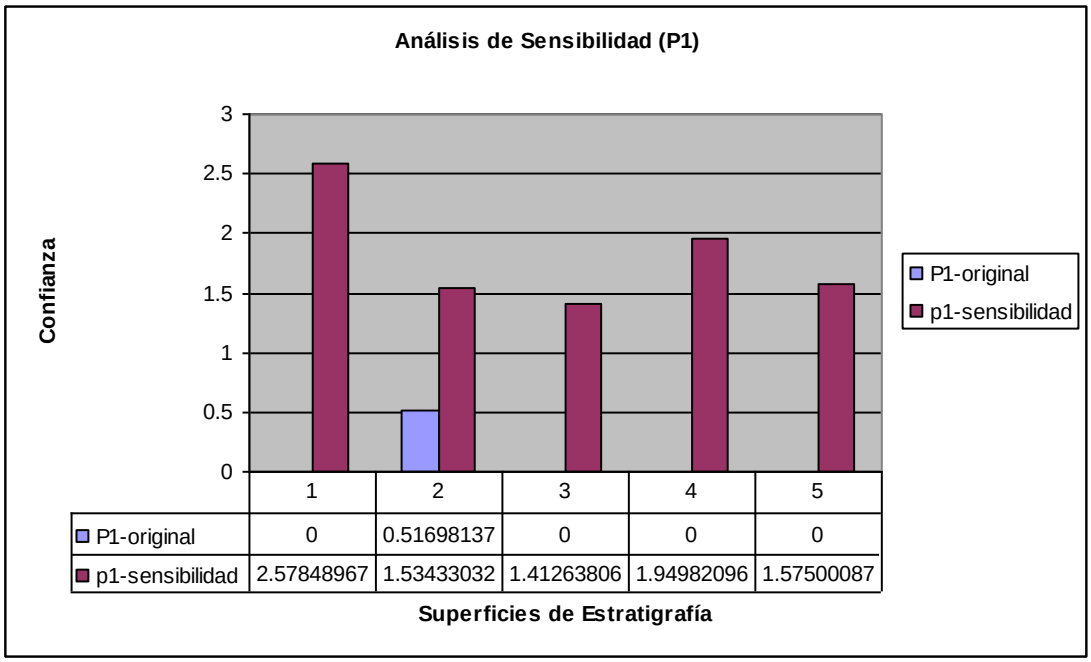
Para la cantidad de datos que se definió para el presente trabajo especial de grado, es decir, la cantidad de mediciones que realizó el algoritmo para obtener los coeficientes de la Tabla 9, se calculó un error de (1/n) x 100, donde n es el número de datos procesados.

Error = 5%

VI.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

La Figura 24, muestra la sensibilidad de pozo P1, nótese que la confiabilidad se incrementa notablemente tras la aplicación del algoritmo. A continuación se muestra sucesivamente en las Figuras 25-27 todas las superficies originales del pozo (P1) marcadas con una línea horizontal muy fina, también se muestran las superficies generadas por el algoritmo con una línea también horizontal muy gruesa; en el mismo gráfico aparecen los registros de pozos: verde para los Rayos Gamma (GRC), amarillo para la porosidad (NPHI), azul para la densidad (RHOB) y rojo para la Resistividad (ILD), así también se muestra la ventana de confiabilidad dentro de la cual se hizo el análisis de sensibilidad como un marco de color negro.

En la siguiente figura hubo un cambio notable en la confiabilidad, sólo la superficie convencional 2, que corresponde con el marcador C3-C (FS2) tuvo alguna confiabilidad en el modelo original, todas las demás superficies tuvieron una confiabilidad nula.



	1	2	3	4	5
P1-original	0	0.51698137	0	0	0
p1-sensibilidad	2.57848967	1.53433032	1.41263806	1.94982096	1.57500087

Figura 24. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P1

Con las Figuras 25-27 se puede analizar el cambio en el modelo de estratigrafía por secuencias de forma gráfica, los registros han sido escalados para poder observar sus variaciones relativas, posteriormente se mostrará una gráfica de resumen donde se reflejará

numéricamente cuanto fue la distancia en pies que se desplazó cada una de las superficies tras la revisión del modelo.

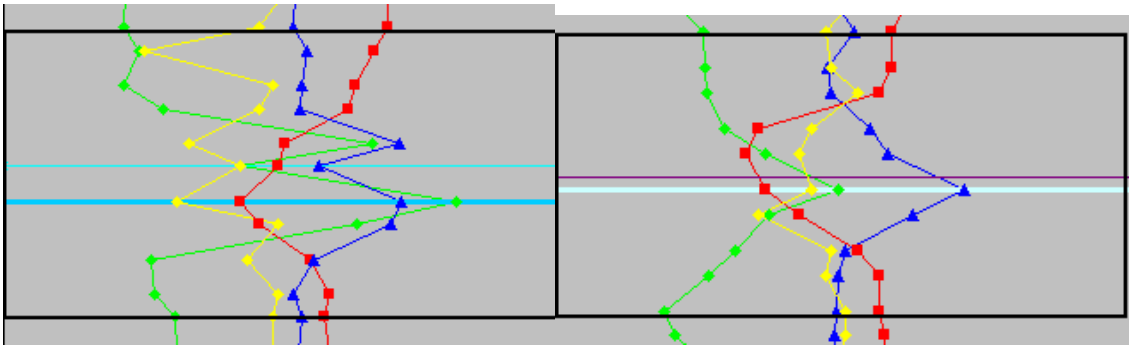


Figura 25. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P1

Tal como se observa en la Figura 25 (izquierda) la línea delgada de color azul claro está colocada en un punto que no tiene congruencia con el patrón de lutita esperado, aun cuando está en una profundidad cercana el programa mide los contrastes en la dirección esperada y no encuentra ninguna confiabilidad. A diferencia de la imagen de la derecha donde la línea delgada de color morado se encuentra en un punto en que el patrón de los registros es coherente aun cuando no se encuentra ubicada en el pico exactamente.

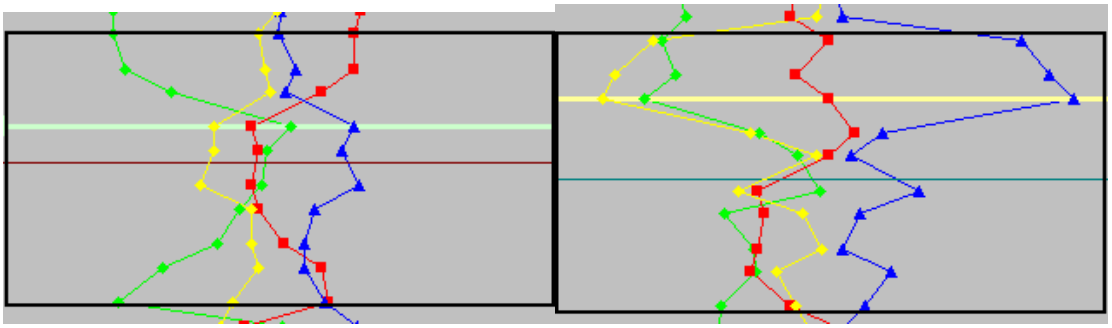


Figura 26. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P1

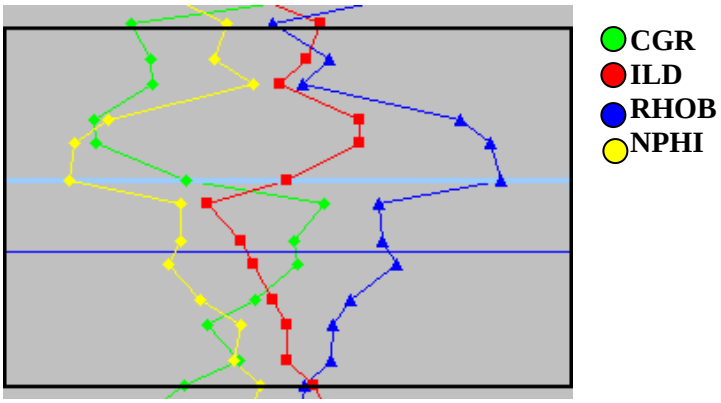
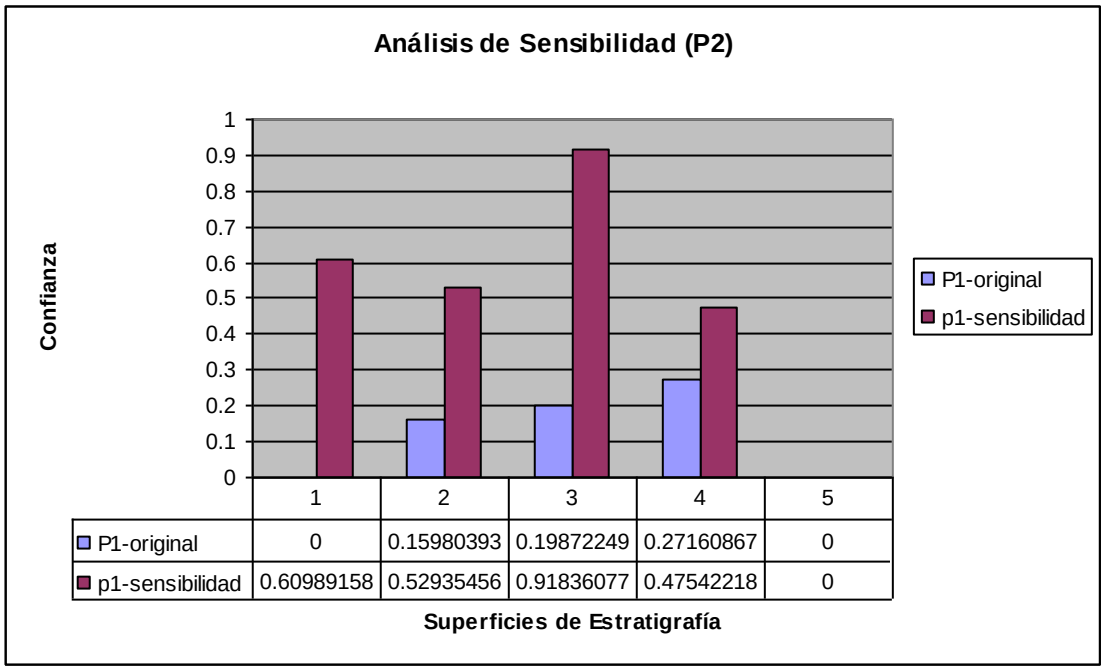


Figura 27. FS5 del Pozo P1

En las Figuras 26 y 27 la línea delgada representa la posición del tope de lutita según el modelo original, mientras que la línea gruesa es la profundidad según el modelo optimizado por medio del análisis de sensibilidad, la confiabilidad en el modelo original para estos tres casos es nula.

En cada uno de los casos anteriormente mostrados la metodología computacional desarrollada en el presente trabajo permitió elegir automáticamente en base al conocimiento descubierto por minería de datos la mejor combinación de registros de pozos en la que se pudo reconocer el "patrón lutita" según la hipótesis que se definió previamente en la metodología.



	1	2	3	4	5
P1-original	0	0.15980393	0.19872249	0.27160867	0
p1-sensibilidad	0.60989158	0.52935456	0.91836077	0.47542218	0

Figura 28. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P2

A continuación en las Figuras 29-30 se muestran los resultados concernientes al pozo P2:

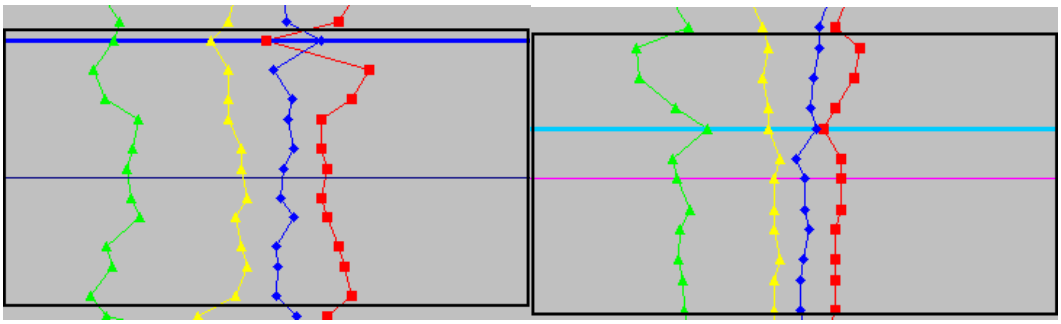


Figura 29. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P2

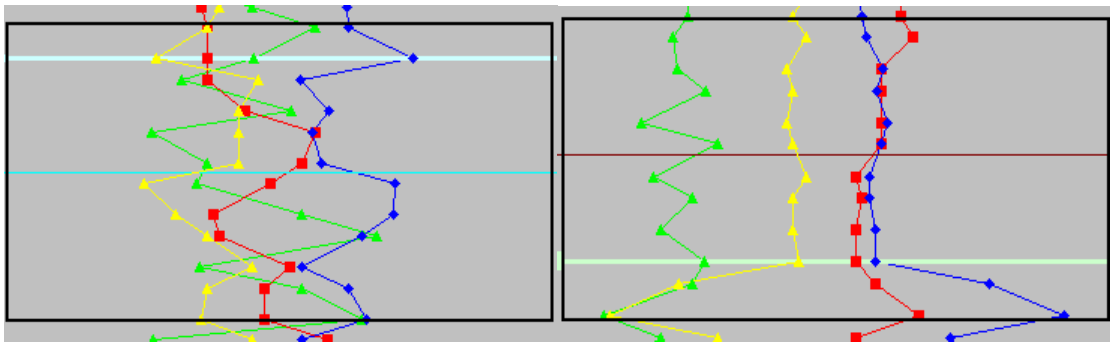
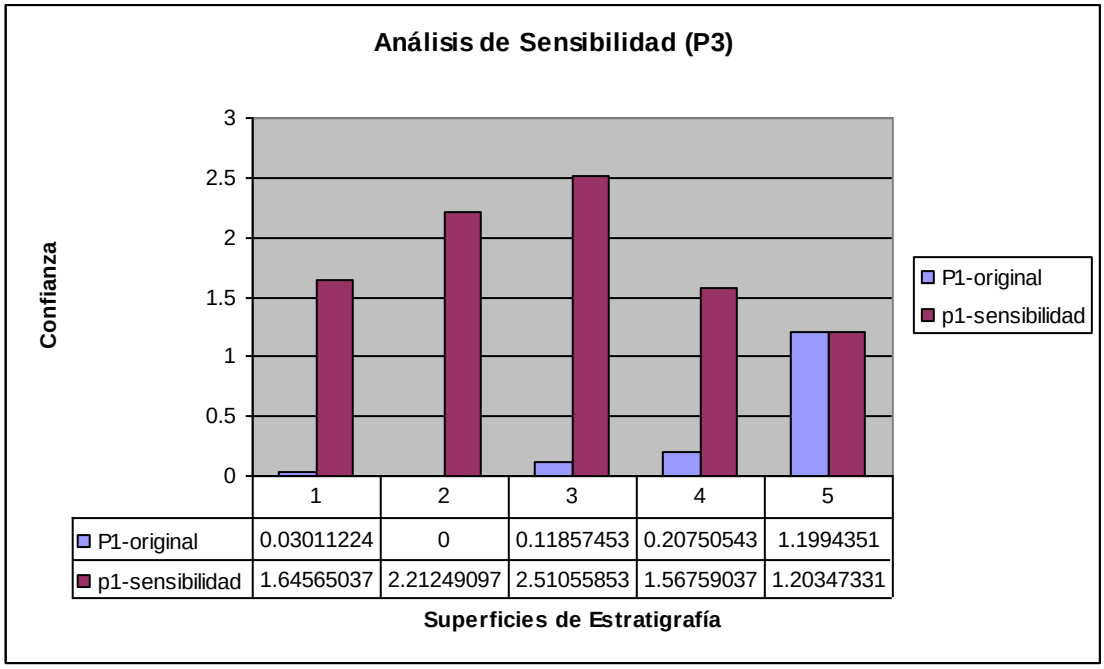


Figura 30. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P2

Obsérvese que la línea gruesa horizontal que representa el modelo ajustado por sensibilidad siempre está colocada relativamente en una "mejor ubicación", la cual corresponde con aquel lugar donde el patrón lutita es más claro, lo que implica contrastes de mayor amplitud.

A continuación los resultados obtenidos del pozo P3:



	1	2	3	4	5
P1-original	0.03011224	0	0.11857453	0.20750543	1.1994351
p1-sensibilidad	1.64565037	2.21249097	2.51055853	1.56759037	1.20347331

Figura 31. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P3

En las Figuras 32-34 se muestran los resultados correspondientes al pozo P3, la línea delgada corresponde al igual que en los casos anteriores a la profundidad según el modelo original y la línea gruesa a la profundidad obtenida por el algoritmo tras el análisis de sensibilidad.

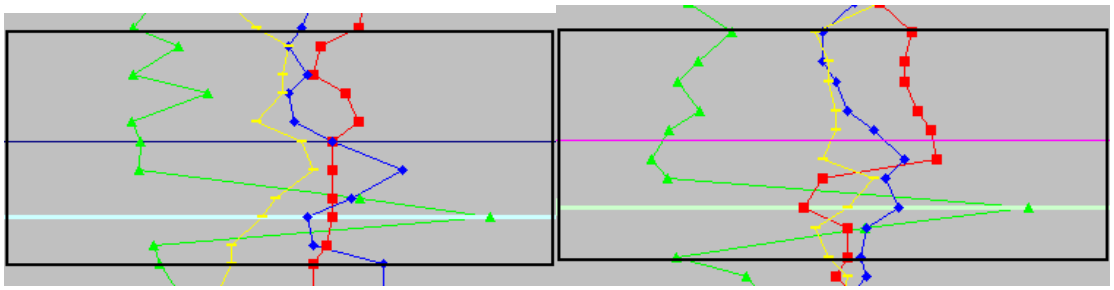


Figura 32. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P3

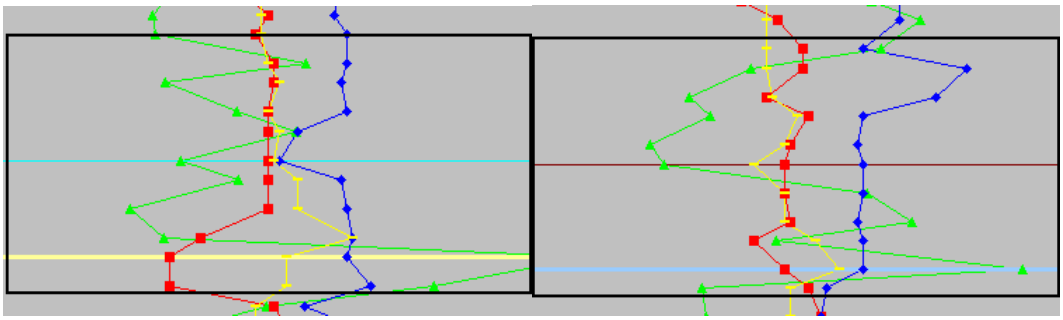


Figura 33. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P3

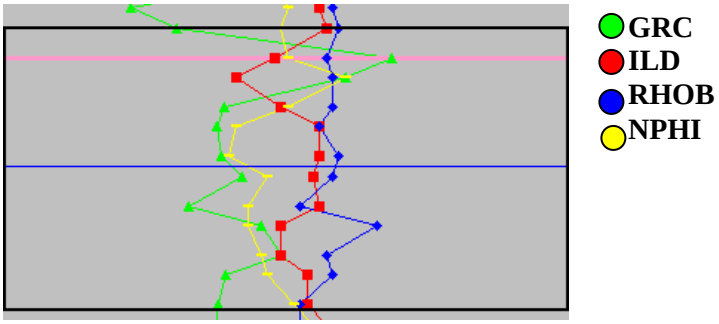
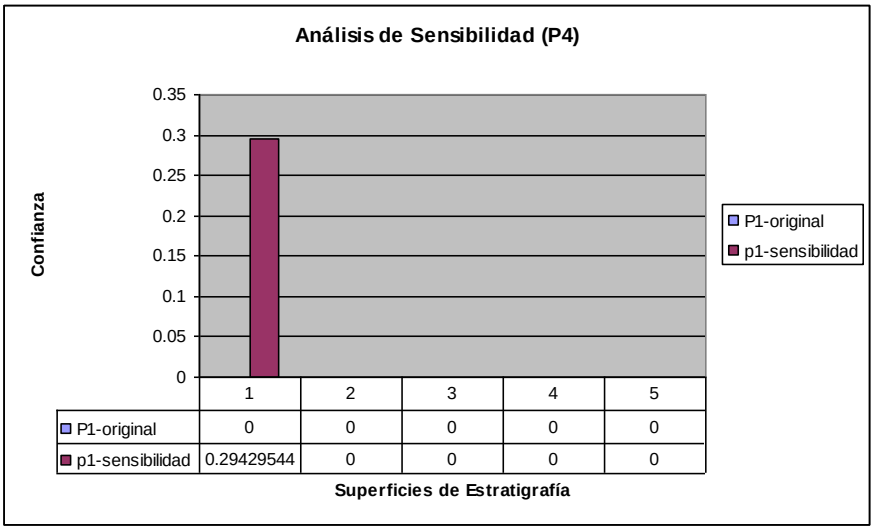


Figura 34. FS5 del Pozo P3

Un registro de rayos gamma normalizado tiene una escala de 0 a 150 API, mientras que uno de Resistividad tiene una escala logarítmica desde 0,2 hasta 2000 tomada originalmente en Ω m, así mismo los registros de Densidad y Porosidad tienen escalas diferentes, para poder colocarlos en una misma gráfica fue necesario normalizar las amplitudes de los registros de manera proporcional para apreciar los contrastes en la misma escala.



	1	2	3	4	5
P1-original	0	0	0	0	0
p1-sensibilidad	0.29429544	0	0	0	0

Figura 35. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P4

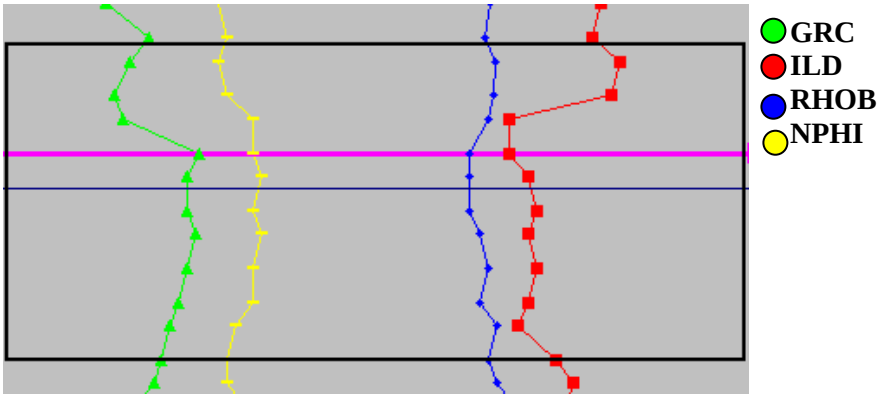
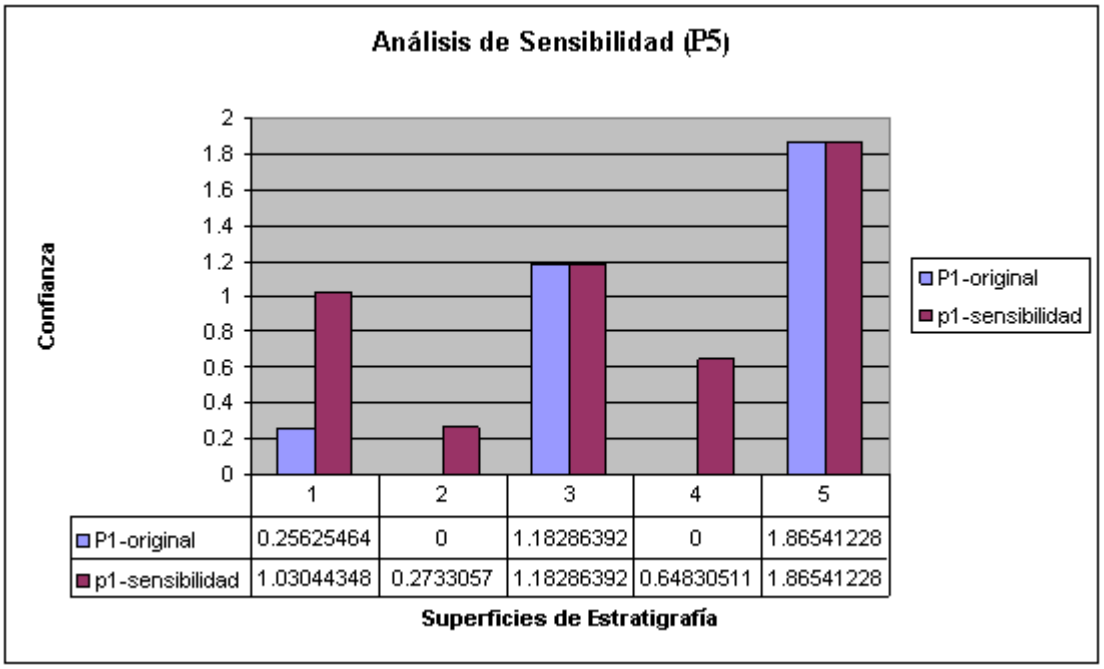


Figura 36. FS1 del Pozo P4

En las Figuras anteriores 35 y 36 se puede observar: el gráfico comparativo de confiabilidad antes y después del ajuste de sensibilidad para el pozo P4 y el cambio en la profundidad de la superficie convencional FS1, respectivamente.

En la siguiente Figura 37 se observa el gráfico comparativo de confiabilidad antes y después del ajuste de sensibilidad para el pozo P5 para las cinco superficies convencionales: FS1, FS2, FS3, FS4 y FS5.



	1	2	3	4	5
P1-original	0.25625464	0	1.18286392	0	1.86541228
p1-sensibilidad	1.03044348	0.2733057	1.18286392	0.64830511	1.86541228

Figura 37. Tabla comparativa entre la confianza original y la obtenida por el algoritmo para el pozo P5

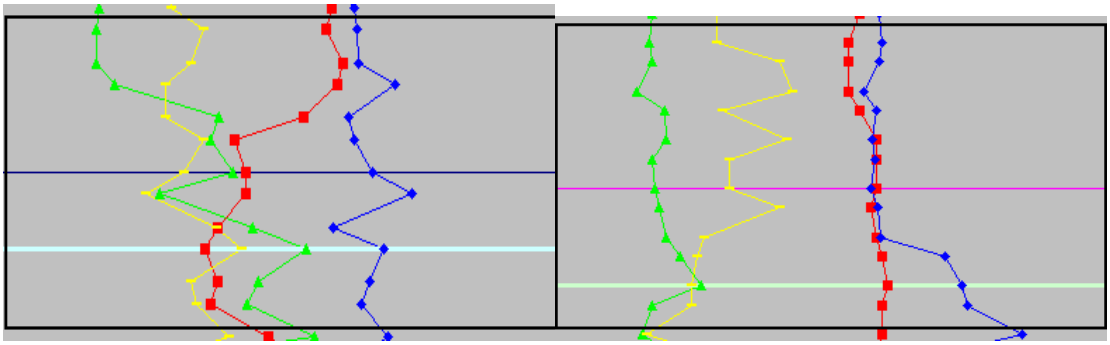


Figura 38. FS1 (izquierda) y FS2 (derecha) del Pozo P5

En la Figura 38 la línea delgada indica la posición de la profundidad en el modelo original y la línea gruesa indica la posición de la misma FS según el modelo optimizado.

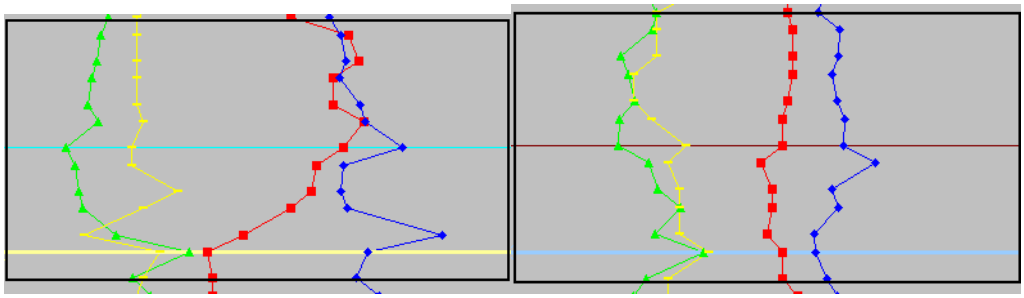


Figura 39. FS3 (izquierda) y FS4 (derecha) del Pozo P5

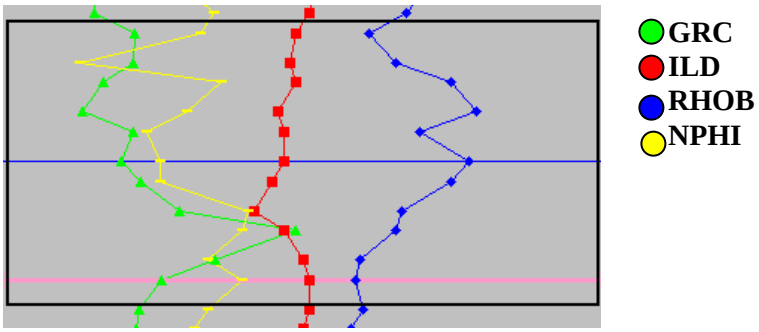


Figura 40. FS5 del Pozo P5

Tal como se observa en el gráfico comparativo de la Figura 37 la confiabilidad medida en la FS3 y la FS5, presentadas en las Figuras 39 y 40 respectivamente, son iguales antes y después del análisis de sensibilidad, sin embargo la posición de la superficie convencional difiere, esto se debe a que la combinación algebraica de los diferentes contrastes tras la aplicación de pesos puede dar resultados iguales, es decir una sensibilidad de 0, sin embargo indica que hay más de una posibilidad para colocar el FS.

Las tablas 10 a 12 muestran respectivamente, los valores originales del modelo de estratigrafía por secuencias cuantificado, los valores ajustados por sensibilidad del modelo y por último la diferencia en valor absoluto entre el modelo y el ajuste.

Tabla 9. Modelo cuantitativo de estratigrafía por secuencias

SECUENCIA C3

	P1	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**
SBC3	14701	15562	15117	18130	17210
C3-B	14820	15681	15188	18190	17290
C3-C	14895	15733	15270	0	17390
C3-D	14959	15800	15385	0	17470
C3-E	15055	15880	15455	0	17605
C3-F	15132	0	15550	0	17700
MFSC3	15380	0	15800	0	17950

La Tabla 10 muestra las profundidades de las diferentes superficies convencionales, según el modelo original, para cada uno de los pozos P1, P2, P3, P4 y P5. Las profundidades están expresadas en pies.

Tabla 10. Ajustes por sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias

MODELO CORREGIDO POR SENSIBILIDAD

	P1	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**
C3-B	14823	15667	15196	18187	17297
C3-C	14896	15728	15277	0	17400
C3-D	14956	15789	15395	0	17482
C3-E	15048	15890	15466	0	17617
C3-F	15126	0	15539	0	17712

La Tabla 10 muestra las profundidades de las diferentes superficies convencionales, según el modelo optimizado por sensibilidad, para cada uno de los pozos P1, P2, P3, P4 y P5. Las profundidades están expresadas en pies.

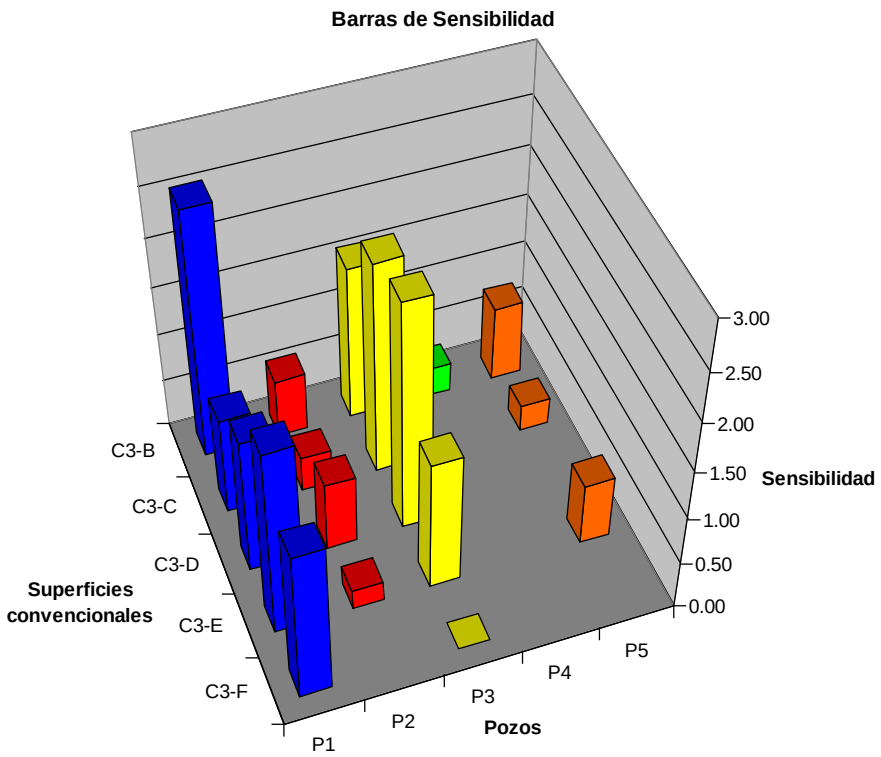
Tabla 11. Diferencia en profundidad entre las tablas anteriores

DIFERENCIA ENTRE EL MODELO Y SU AJUSTE (EN PIES)

	P1	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**
C3-B	3	14	8	3	7
C3-C	1	5	7	0	10
C3-D	3	11	10	0	12
C3-E	7	10	11	0	12
C3-F	6	0	11	0	12

La Tabla 11 muestra las diferencias de profundidades de las diferentes superficies convencionales, existentes entre el modelo optimizado por sensibilidad y el modelo original, para cada uno de los pozos P1, P2, P3, P4 y P5. Las profundidades están expresadas en pies.

La Figura 41 ilustra la sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias V9 a cada una de las superficies convencionales para cada uno de los pozos. La Tabla en la parte inferior de esta figura proporciona los coeficientes de sensibilidad arrojados por las rutinas numéricas implementadas a lo largo de este trabajo.



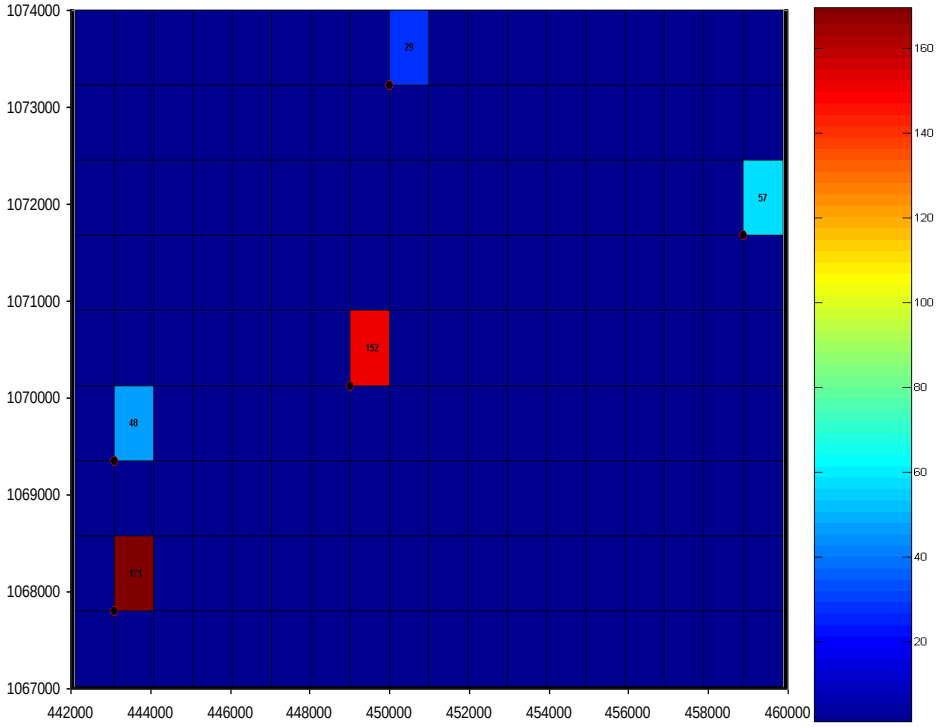
	C3-B	C3-C	C3-D	C3-E	C3-F
P1	2.58	1.02	1.41	1.95	1.58
P2	0.61	0.37	0.72	0.20	
P3	1.62	2.21	2.39	1.36	0.00
P4	0.29				
P5	0.77	0.27		0.65	

Figura 41. Sensibilidad del modelo de estratigrafía por secuencias V-9

El mapa de sensibilidad mostrado en la Figura 42 expresa el promedio de los niveles de sensibilidad individualmente ilustrados en la Figura 41, el mapa es mostrado en planta y sobre la posición de cada pozo se colocó un "semáforo" el cual muestra el grado de sensibilidad que tiene dicho pozo en general, la escala de colores es relativa, por lo que el pozo menos sensible, es decir el más confiable del modelo original, será de color azul, por lo que a medida que la sensibilidad crezca así también variará el color del símbolo sobre el pozo mostrando así su Sensibilidad relativa en el contexto del área de estudio.

En el mapa de la Figura 42, se pueden apreciar cinco cuadros de colores, cada uno representa el nivel de sensibilidad de un pozo específico, también se observa un punto de color negro en la esquina inferior izquierda de cada cuadro, que define la posición exacta del pozo en cuestión; y por último en el centro de cada cuadro hay un número que es el valor de la sensibilidad expresado cuantitativamente.

La escala gráfica corresponde con una escala numérica lineal asociada a un color dado. El grado Confianza del Modelo se calcula como: $Confianza = \left(\frac{1}{Sensibilidad}\right) \times 100$ dividido entre la máxima Confiabilidad de los pozos para obtener un valor proporcional.



	P1	P2	P3	P4	P5
% Confianza	17.24	61.86	19.40	100.00	52.06

Figura 42. Mapa de sensibilidad y grado de confiabilidad

CAPITULO VII

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan las interpretaciones subsiguientes a los resultados anteriormente expuestos, así como la verificación de las hipótesis. Este capítulo sirve de preámbulo para las conclusiones y las recomendaciones.

VII.1. DEFINICIÓN EL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIA DE LA ZONA EN ESTUDIO.

Tal como se planteó en el primer objetivo específico se realizó una investigación previa para definir la zona de estudio, la cual cuenta con un número finito de pozos, un intervalo de tiempo específico y un contexto definido; dicha zona de interés se escogió con base al marco tectónico, la disponibilidad de un modelo de estratigrafía por secuencias actualizado y revisado, así como el acceso a datos de registros de pozo e información geológica pertinente como: bioestratigrafía y estratigrafía. Todos los elementos anteriormente enunciados son de importancia dado que con los datos bioestratigráficos, específicamente con los foraminíferos encontrados en los núcleos (*Ariadnaesporites sp, S. echiatus y S. bacuatus*) fue posible para Rondón *et al*, (2002) definir la secuencia C3 como de edad Cretácica, además con la información estratigráfica desarrollada por los autores citados en el capítulo de antecedentes se pudo determinar la existencia de los topes de lutitas presentes en cada pozo.

La importancia de la edad Cretácica del intervalo cronológico de interés, así como de la posición de los topes de lutita presentes en cada pozo, radica en el contexto tectónico pasivo para esta época constituye una pieza importante para evaluar las secuencias estratigráficas y los topes de lutita que definen las superficies de inundación del modelo bajo análisis.

Dentro del modelo planteado por PDVSA-INTEVEP se eligió una ventana de tiempo específica, la cual corresponde con un sistema depositacional en alta (*HST*) en el Cretácico, dicha selección se basó en las condiciones geológicas del problema con las consideraciones geoestadísticas para su estudio.

La presentación de dicho modelo está en formato gráfico (Véase Figura 22) tomando como base esta imagen se procedió a generar un modelo numérico tal como se explicará a continuación.

VII.2. CUANTIFICACIÓN DEL MODELO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS MENCIONADO ANTERIORMENTE.

Con una observación minuciosa se determinó la profundidad en la que estaba cada superficie convencional del modelo de estratigrafía dado la naturaleza de la geología: con los acuñamientos y cambios laterales de espesor, una misma superficie, que puede ser correlacionada en diferentes pozos, tiene en cada uno de ellos una profundidad diferente. Por lo explicado anteriormente se escogió el formato de tabla, ya que permite observar en el punto de intersección de las filas (superficies convencionales) y columnas (pozos) cual es la profundidad de una superficie dada, en un pozo dado, con ello se definió cuantitativamente el modelo de estratigrafía por secuencias. (Ver Tabla 8)

VII.3. COMPARACIÓN EL MODELO TEÓRICO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS CON EL MODELO NUMÉRICO DE ESTRATIGRAFÍA POR SECUENCIAS, AMBOS DE LA ZONA EN ESTUDIO.

Al realizar la comparación entre la posición de la superficie convencional tal como se muestra en la Figura 22, respecto al registro de pozos de rayos gamma; con la profundidad de dicho pico en el registro se pudo determinar que efectivamente la cuantificación anteriormente explicada era la ideal, dado que existía una correspondencia entre la ubicación en profundidad para cada registro de pozo, además este método permitió afinar con un mayor grado de precisión la posición exacta de la superficie con lo que se alcanzó en definitiva el modelo cuantitativo de estratigrafía por secuencias que se muestra en la Tabla 7 del capítulo *op cit*.

VII.4. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA SENSIBILIDAD DEL MODELO A TRAVÉS DE LAS TÉCNICAS DE MINERÍA DE DATOS Y GEOESTADÍSTICA

Las técnicas de minería de datos empleadas en el presente trabajo especial de grado se emplearon para descubrir la relevancia relativa que tienen los registros de pozos entre sí, la cual definió como el contraste relativo de una propiedad medida a través del registro respectivo. Mientras mayor sea la variación de un registro específico al llegar hasta una lutita, mayor será su

relevancia para efectos de la confiabilidad. Como resultado de dicho procedimiento, el cual se explicó en detalle en el capítulo de metodología, se obtuvo una tabla contentiva de los coeficientes de relevancia de cada uno de los registros de pozos (Véase Tabla 9), dichos coeficientes constituyen el peso a aplicar en cada contraste respectivamente, los cuales fueron luego adicionados en una suma ponderada que dio como resultado la confiabilidad del modelo.

La confiabilidad mide la congruencia de los registros de pozos, una alta confiabilidad implica altos contrastes en cada uno de los registros, los cuales de forma congruente con el patrón esperado para el objetivo de búsqueda que son las superficies de inundación (FS) dan un mayor grado de fundamento y base para afirmar efectivamente que la posición donde se determinó la presencia de un tope de lutita es correcta.

Dado que el presente estudio utiliza como principal insumo el modelo estratigráfico V-9 de PDVSA-INTEVEP, la sensibilidad o análisis residual se define precisamente como la diferencia entre la confianza medida en el modelo original y la de un modelo optimizado matemáticamente, el cual fue obtenido a través de las rutinas diseñadas en e presente trabajo de investigación.

Dado que la ventana dentro de la cual se realizó la optimización del modelo es la misma para todas las superficies, la variación de esta diferencia entre la confianza original y la del modelo optimo implica el grado de magnitud de un error, puesto que un pequeño cambio en la profundidad de la superficie convencional trae consigo un gran cambio en la interpretación del modelo.

El contraste propiamente dicho es representado con la amplitud del pico/valle, tal como se explicó detalladamente en el capítulo de metodología (Véase Regla del Triángulo), y la confianza es la suma ponderada de los contrastes con la aplicación de los pesos específicos dados por los coeficientes de relevancia, aprendidos a través de la minería de datos.

VII.5. ANÁLISIS DEL CÁLCULO DE CONFIABILIDAD

A continuación en la tabla 12 se presenta un análisis caso a caso de cada una de las superficies convencionales dadas en cada uno de los pozos, con la intención de ilustrar y resaltar los aspectos más relevantes del funcionamiento del análisis y sus implicaciones prácticas en el contexto.

Tabla 12. Para el pozo P1

Superficie Convencional	Descripción
FS1 (C3-B)	La superficie original no muestra ninguna relación con el patrón esperado de un tope de lutita, mientras que la superficie optimizada está perfectamente ajustada en los cuatro registros con el patrón esperado. La diferencia es apreciable
FS2 (C3-C)	La superficie original y la optimizada se encuentran muy cercanas, la optimización sólo aporta una corrección de precisión.
FS3 (C3-D)	La superficie original se encuentra cercana a la optimizada, sin embargo no muestra congruencia con el patrón esperado de un tope de lutita, a diferencia de la asociación del modelo optimizado.
FS4 (C3-E)	Tanto la superficie optimizada como la original tienen discrepancias con el patrón esperado de una superficie de inundación. Aun así la interpretación del modelo original se basó en el apilamiento de patrones congruentes con un margen de tolerancia muy amplio, mientras que el algoritmo se decantó por contrastes muy llamativos de densidad y porosidad que compensaban el apilamiento de contrastes más pequeños aunque congruentes.
FS5 (C3-F)	Semejante al caso anterior.

La tabla 13 representa el análisis para cada una de las superficies del pozo P2.

Tabla 13. Para el pozo P2

Superficie Convencional	Descripción
FS1 (C3-B)	La superficie original no guarda ninguna congruencia con el patrón de lutita, mientras que la superficie optimizada se ubica en un lugar de clara congruencia con el patrón esperado. Diferencia muy significativa.
FS2 (C3-C)	Semejante al caso anterior.
FS3 (C3-D)	No se observa en la ventana ninguna expresión clara del patrón esperado de un tope de lutita, sin embargo dentro de los posibles candidatos de una correspondencia parcial se observa que la superficie del modelo optimizado está mejor ubicada. La diferencia de las profundidades es apreciable.
FS4 (C3-E)	*Idem* al caso anterior

La tabla 14 resume las descripciones más significativas de las diferencias de las superficies para el pozo P3.

Tabla 14. Para el pozo P3

Superficie Convencional	Descripción
FS1 (C3-B)	La superficie original no guarda ninguna congruencia con el patrón de lutita, mientras que la superficie optimizada se ubica en un lugar de clara congruencia con el patrón esperado. Diferencia muy significativa.
FS2 (C3-C)	Semejante al caso anterior.
FS3 (C3-D)	Semejante al primer caso.
FS4 (C3-E)	*Idem* al caso anterior
FS5 (C3-F)	La superficie original se encuentra asociada a un patrón de lutita que es menos claro que el patrón elegido en el modelo optimizado.

La Tabla 15 indica que sólo una superficie convencional pasa por el pozo P4.

Tabla 15. Para el pozo P4

Superficie Convencional	Descripción
FS1 (C3-B)	La superficie original se encuentra cercana a la optimizada, sin embargo no muestra congruencia con el patrón esperado de un tope de lutita, a diferencia de la asociación del modelo optimizado.

La Tabla 16 resume las características principales de las superficies optimizadas mediante las rutinas empleadas a lo largo de la presente investigación para el pozo P5.

Tabla 16. Para el pozo P5

Superficie Convencional	Descripción
FS1 (C3-B)	El patrón asociado a la superficie optimizada es congruente excepto en el registro de porosidad, sin embargo los contrastes son de poca amplitud. En cambio el patrón asociado a la superficie del modelo original sólo es congruente en el registro de rayos gamma.
FS2 (C3-C)	La superficie original no guarda ninguna congruencia con el patrón de lutita, mientras que la superficie optimizada se ubica en un lugar de congruencia parcial con el patrón esperado.
FS3 (C3-D)	Semejante al caso anterior.
FS4 (C3-E)	Semejante al primer caso.
FS5 (C3-F)	No se observa ningún patrón congruente con una lutita, al analizar los datos se observa un cierto desfase entre ellos.

VII.6. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS A TRAVÉS DE LAS CARTAS SEDIMENTOLÓGICAS DE LOS NÚCLEOS DEL CAMPO EL FURRIAL.

Para verificar que efectivamente el algoritmo estuviera reconociendo el "patrón lutita" y que el ajuste recomendado fuera efectivamente más confiable que el planteado por el modelo original se hizo necesaria una revisión de la información de núcleos mediante las cartas sedimentológicas disponibles, con ello se logró una verificación de la hipótesis sobre si efectivamente las reglas matemáticas y herramientas computacionales empleadas estaban reflejando la realidad geológica, lo cual es el objetivo fundamental del presente trabajo especial de grado.

VII.6.1. POZO P1 (Ver Anexos):

Para este pozo se hizo un análisis detallado de la superficie B, la cual se encuentra ubicada a razón de las siguientes profundidades según el modelo:

Tabla 17. Análisis comparativo con la información de núcleos

Modelo de referencia	Profundidad de la superficie B
Modelo Original (Modelo V-9, Rondón et al)	14.820’
Modelo según las cartas sedimentológicas	14.777’
Modelo optimizado por sensibilidad	14.823’

Información de núcleos a la profundidad del modelo original:

Arenisca de grano fino con estratificación paralela y cruzada con grano bien escogido y redondeado, que forma parte de un paquete grano creciente hacia el tope, interpretados en el ambiente como una barra de marea. Esta arenisca se encuentra muy cercana a una lutita con características de interés que se explicarán a continuación.

Información de núcleos a la profundidad del modelo de la carta sedimentológica:

Lutita perteneciente a un paquete de intercalación con areniscas, la lutita presenta una alta bioturbación de planolites, así como las siguientes estructuras sedimentarias: estratificación lenticular, estratificación ondulada y rizaduras de corriente, en ella había Pirita como accesorio que se observó en la descripción de núcleos. Los granos están bien escogidos y muy redondeados, siendo de hecho la parte de grano más fino en una secuencia grano decreciente hacia el tope interpretada como una llanura de marea.

Información de núcleos a la profundidad del modelo optimizado:

Interfaz entre una arenisca de grano muy fino y una lutita que culmina en su parte más basal la secuencia grano creciente descrita para el modelo original, tiene estratificación ondulatoria y lenticular, así como accesorios de pirita, también se observaron ligeras bioturbaciones sin diferenciar, tiene grano bien escogido y anguloso, la lutita fue interpretada en el ambiente como una llanura de marea.

Análisis de Resultados en la comparación con la información de núcleos:

Existe una diferencia de profundidad entre el modelo de la carta sedimentológica y los modelos original y optimizado (aproximadamente 50 pies) así como una discrepancia significativa entre los registros de pozos y la litología descrita: los registros de rayos gamma del núcleo y del registro muestran una diferencia de profundidad que implica una calibración

registro-núcleo con imprecisiones, para el modelo de la carta sedimentológica la resistividad muestra una tendencia creciente y una porosidad relativamente alta.

La alternancia entre areniscas y lutitas, así como la cantidad de bioturbaciones reportadas en la descripción litológica del modelo de la carta sedimentológica muestran evidencia que apunta hacia un ambiente próximo costero con influencia fluvial y de marea. En cambio en el modelo original el registro de rayos gamma y resistividad se muestran coherentes con la descripción litológica de una arenisca, lo cual difiere de la concepción original que espera un tope de lutita, en cambio el modelo optimizado muestra una clara coherencia en los registros de pozos con el patrón esperado en una lutita, por lo que la observación de estar en la interfaz podría ser interpretada como una ligera imprecisión, con respecto a registro de rayos gamma del núcleo se observa una discrepancia significativa por lo que se infiere que la calibración registro-núcleo provoca un corrimiento de la litología.

La lutita que se encuentra muy cercana a la superficie designada por el modelo optimizado muestra menos bioturbaciones y mayor grosor que la perteneciente al modelo de la carta sedimentológica, además se observa que es un punto de inflexión entre dos tendencias, una subyacente con tendencia grano decreciente hacia el tope y otra grano creciente que comienza a partir de dicha lutita.

Con estas observaciones se puede afirmar que la lutita que se encuentra cercana a la superficie del modelo optimizado tiene características que la definen como un marcador más confiable de correlación, dado que al tener un ambiente más marino profundo que la propuesta en la carta sedimentológica está menos propensa a ser interrumpida por cambios ligeros en la línea de costa, lo que en consecuencia la califica como un marcador más regional, la diferencia de profundidad entre la posición de dicha lutita en el núcleo tiene un error menor a 3 pies, el cual se atribuye a una calibración núcleo-pozo ligeramente imprecisa.

VII.6.2. Pozo P2 (Ver Anexos):

Para este pozo se hizo un análisis detallado de la superficie B, la cual se encuentra ubicada a razón de las siguientes profundidades según el modelo:

Tabla 18. Análisis comparativo con la información de núcleos

Modelo de referencia	Profundidad de la superficie B
Modelo Original (Modelo V-9, Rondón et al)	15.681’
Modelo según las cartas sedimentológicas	15.654’
Modelo optimizado por sensibilidad	15.667'

Información de núcleos a la profundidad del modelo original:

Existe una amplia discrepancia entre la profundidad del modelo de la carta sedimentológica y la del modelo original, la cual es mayor que la ventana de análisis, tal como en el caso anterior. La descripción litológica del núcleo es coherente con todos los registros petrofísicos y se describe como una arenisca limpia con estratificación cruzada al tope, sin bioturbaciones ni fósiles.

Información de núcleos a la profundidad del modelo de la carta sedimentológica:

Lutita con una gran coherencia entre la descripción litológica y los registros de pozos, con presencia de planolites, estratificación paralela y ondulada. El espesor de la lutita es pequeño y forma parte de un pequeño transecto que es una intercalación de areniscas de grano fino con lutitas, dicha intercalación está inserta entre dos enormes paquetes de arenisca, mostrando una clara tendencia hacia un ambiente marino si se compara con los paquetes supra y subyacentes.

Información de núcleos a la profundidad del modelo optimizado:

La superficie apunta a la única capa dentro del paquete de arenisca al que pertenece el marcador del modelo estratigráfico V-9 que muestra una ligera tendencia marina, se trata de una capa muy fina de lutita orgánica con ligeras bioturbaciones y estructuras tipo Humoky, así como rizaduras y huellas de carga.

Análisis de Resultados en la comparación con la información de núcleos:

En este caso el modelo propuesto por la carta sedimentológica está bien ajustado a la superficie de inundación FS que marca tanto en la descripción de núcleos como en los registros petrofísicos, mientras que el modelo V-9 está muy alejado del concepto de superficie de inundación que se busca.

La superficie designada por medio del algoritmo señala la única capa dentro de una secuencia sumamente desfavorable que pudiera ser interpretada como una lutita, sin embargo en este caso no es una superficie de inundación lo que remarca la necesidad de tener buenos datos para poder obtener resultados de calidad.

Para este pozo se hizo un análisis detallado de la superficie C, la cual se encuentra ubicada a razón de las siguientes profundidades según el modelo:

Tabla 19. Análisis comparativo con la información de núcleos

Modelo de referencia	Profundidad de la superficie C
Modelo Original (Modelo V-9, Rondón et al)	15.789’
Modelo según las cartas sedimentológicas	15.654’
Modelo optimizado por sensibilidad	15.667’

Información de núcleos a la profundidad del modelo original:

Arenisca limpia de grano fino con huellas de carga y estratificación cruzada, con una respuesta coherente en los registros de pozo comparado con la litología y se observa una buena calibración núcleo-registro.

Información de núcleos a la profundidad del modelo de la carta sedimentológica:

Lutita perteneciente a una intercalación de limolitas y arcilitas, con algunas bioturbaciones de planolites, muestra una buena coherencia con los registros de pozos y con el ambiente interpretado de llanura de mareas.

Información de núcleos a la profundidad del modelo optimizado:

Arenisca con una alta deflexión en la curva de rayos gamma, perteneciente al paquete de arenas al que pertenece el marcador del modelo V-9. Muestra estructuras de carga y rizaduras. Se atribuye la deflexión a un mayor contenido de matríz.

Análisis de Resultados en la comparación con la información de núcleos:

La carta sedimentológica es precisa en la colocación del marcador sobre una posible superficie de inundación con gran potencial de tener una extensión mayor que local, mientras que el modelo V-9 coloca su marcador en un paquete de areniscas sin ninguna lutita o capa cercana que tuviera la posibilidad de ser considerada como lutítica, por lo que el algoritmo apunta hacia la capa con la mayor coherencia.

Al observa los registros de pozos de los anexos del propio modelo V-9 se ve una tendencia que es coherente con la de la carta sedimentológica. Para este pozo se hizo un análisis detallado de la superficie D, la cual se encuentra ubicada a razón de las siguientes profundidades según el modelo:

Tabla 20. Análisis comparativo con la información de núcleos

Modelo de referencia	Profundidad de la superficie D
Modelo Original (Modelo V-9, Rondón et al)	15.800’
Modelo según las cartas sedimentológicas	15.887’
Modelo optimizado por sensibilidad	15.789’

Información de núcleos a la profundidad del modelo original:

Arenisca con rizaduras y sin bioturbaciones interpretada como una barra de marea.

Información de núcleos a la profundidad del modelo de la carta sedimentológica:

Interfaz entre una lutita perteneciente a un ambiente de llanura de mareas y una arenisca perteneciente a una barra de mareas, la lutita tiene bioturbaciones de planolites y estructuras tipo Humoky, además la deflexión de los registros de pozos es coherente aunque de poco contraste.

Información de núcleos a la profundidad del modelo optimizado:

Coincide con la intercalación de lutitas y limolitas mencionadas anteriormente para la superficie anterior "C", en este caso el marcador apunta hacia el borde de la ventana de análisis, que tiene una coherencia mucho mayor con el concepto de superficie de inundación que las inmediaciones del marcador propuesto por el informe del modelo V-9.

Análisis de Resultados en la comparación con la información de núcleos:

La diferencia de profundidad es tal que el marcador del modelo optimizado prácticamente coincide con el marcador de la superficie anterior según la carta sedimentológica, lo que define un desfase importante y una diferencia significativa entre los modelos.

Es importante recalcar que las superficies señaladas por la carta sedimentológica son para todos los casos del pozo P2 más adecuadas que las propuestas por el modelo V-9, y que en todos los casos el algoritmo de sensibilidad apuntó hacia una superficie que dentro del contexto es mejor marcador "lutítico" que el propuesto en el modelo original.

VII.6.3. Pozo P3 (Ver Anexos):

Para este pozo se hizo un análisis detallado de la superficie B, la cual se encuentra ubicada a razón de las siguientes profundidades según el modelo:

Tabla 21. Análisis comparativo con la información de núcleos

Modelo de referencia	Profundidad de la superficie D
Modelo Original (Modelo V-9, Rondón et al)	15.681’
Modelo según las cartas sedimentológicas	15.654’
Modelo optimizado por sensibilidad	15.667’

Información de núcleos a la profundidad del modelo original:

Sin recuperación de núcleo con una deflexión pobre en contraste en los registros petrofísicos.

Información de núcleos a la profundidad del modelo de la carta sedimentológica:

Lutita con concreciones y sin bioturbaciones que corresponde con la terminación de una secuencia grano decreciente hacia el tope, interpretada como una llanura de marea, la lutita reportó un color de gris oscuro a negro. La lutita marcada por este modelo es también el punto de grano más fino en una secuencia grano creciente hacia el tope.

Información de núcleos a la profundidad del modelo optimizado:

Zona sin recuperación con una muy importante deflexión en los registros de pozos que indica la presencia de una lutita.

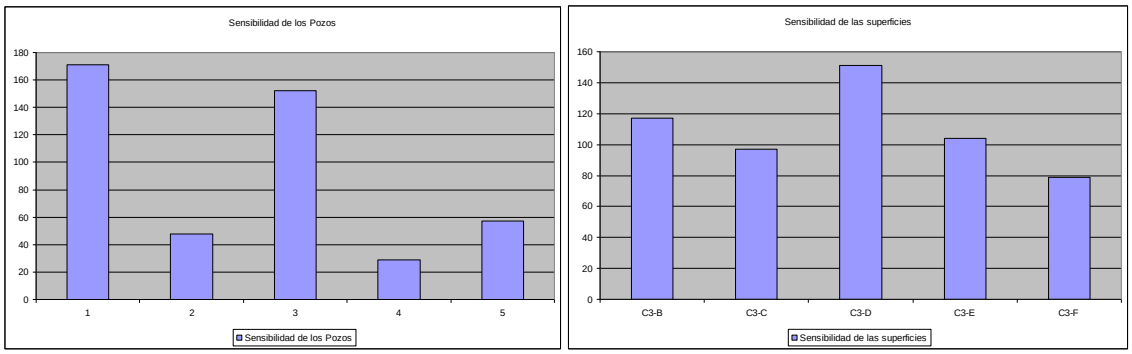
Análisis de Resultados en la comparación con la información de núcleos:

Dada la falta de información en el área de interés no se puede sacar mucha información en este análisis, sin embargo es importante recalcar que el marcador del modelo optimizado apunta a la zona más coherente con un marcador de superficie de inundación en la ventana de análisis que es adyacente al punto marcado en el modelo V-9.

El marcador elegido en el modelo de la carta sedimentológica muestra unas características más confiables dentro de lo que se logró recuperar en núcleos, sin embargo el espesor no recuperado pudo ser clave y dada la falta del material la carta carece de los datos suficientes para la correcta interpretación y por tanto de la correlación.

De los análisis anteriores se desprenden tres tipos de incongruencias, que posiblemente se deban a algún tipo de fluctuación en los datos originales, problemas de precisión por parte del intérprete atribuibles a la escala de observación en que fueron analizadas y determinadas las superficies convencionales y por último otras imprecisiones asociadas a diversos patrones.

Las figuras 43 (A) y (B) muestran el promedio de las sensibilidades asociadas en la primera a los pozos y la segunda a las superficies indistintamente del pozo:



(A) **(B)**

Figura 43. Comparación de sensibilidades por (A) por pozo y (B) por superficie

Analizando la Figura 43 considerando la Figura 41 del capítulo de resultados, las cuales resumen el impacto que se produjo en la confiabilidad del modelo tras el cambio de la profundidad del modelo original al modelo optimizado por el análisis de sensibilidad, y tras verificar su validez geológica con el estudio de las cartas sedimentológicas se puede asegurar que:

- El mayor aporte de sensibilidad para el pozo P1 lo da la superficie C3-B, mientras que el menor aporte lo da la superficie C3-C. Lo cual corresponde con la relación entre los valores promedios de las superficies que se observan en la Figura 42.
- El mayor aporte al promedio de sensibilidad del pozo P2 es dado por la superficie C3-D, y el menor aporte es de la superficie C3-E. Igualmente se observa una correspondencia con los valores relativos de la Figura 42.
- En el caso del pozo P3 el mayor aporte a la sensibilidad lo da la superficie C3-D, mientras que el menor aporte lo da la superficie C3-F. Lo cual es también correspondiente con el patrón observado en la Figura 42.
- En el pozo P4 sólo hay una superficie a considerar, la C3-B, cuyo valor de sensibilidad es el menor entre todos los pozos.
- Por último para el pozo P5 la superficie con el mayor aporte de sensibilidad es la C3-B y la menor es de dos superficies la C3-F y la C3-D, nulas para ambos casos. Lo que muestra una discrepancia con el patrón de la Figura 42, en la que la C3-D es mayor en sensibilidad que la C3-B y a su vez distinta de la C3-F, sin embargo la relación entre las sensibilidades promedios para las superficies C3-B y C3-F se mantiene.

Se puede observar también que los Pozos P1 y P3 muestran una alta sensibilidad comparado con los otros pozos y que las superficies C3-B y C3-D muestran también valores atípicamente altos de sensibilidad. Adicionalmente realizando un análisis cruzado entre los pozos P1 y P3 con las superficies C3-B y C3-D se observa que las superficies FS1-P1 y FS3-P3 son valores máximos generales, los cuales en comparación son ambos mayores a 2.3 y C3-B es ligeramente mayor que C3-D, otro patrón atípico en comparación con la relación de los promedios de la Figura 42, lo que resalta aun más la sensibilidad de la superficie C3-B.

La superficie C3-B muestra distintivamente un alto grado de imprecisión atribuible a los tres tipos fundamentales que fueron descritos anteriormente, los cuales en conjunto agregaron una alta sensibilidad al modelo.

La superficie C3-D es un caso semejante al anteriormente explicado.

VII.7. MAPA DE SENSIBILIDAD

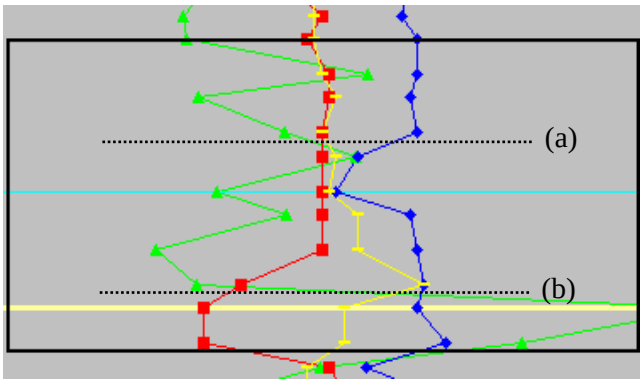
Tal como se observó en la Figura 42 del capítulo de resultados cada uno de los pozos tiene un valor de sensibilidad diferente, entre los cuales resaltan el pozo P1 con un valor de sensibilidad de 171, y el pozo P3 con un valor de sensibilidad de 152, ambos pozos tienen

valores atípicamente altos en todas las superficies, los cuales incrementan los valores promedio de sensibilidad promedio de las superficies en gran medida.

Una revisión minuciosa del pozo P3 muestra una colocación de las superficies de inundación FS a lo largo de todo el pozo que no corresponde con el patrón lutita que se empleó para el presente trabajo especial de grado, a diferencia del pozo P1 donde los errores están asociados a problemas de sincronización con respecto a la profundidad entre los diferentes datos, dicho desfase genera una imprecisión que incrementa notablemente la sensibilidad asociada a este pozo.

La significativa sensibilidad de los pozos P1 y P3 resalta por encima de la asociada a los pozos P2, P4 y P5, lo que demuestra la efectividad de este método de análisis para detectar problemas en el modelo de estratigrafía por secuencias.

VII.7.1. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-D en el pozo P3



Al observar la imagen de la izquierda se pueden apreciar dos aspectos resaltantes: primero, la asincronía entre los datos con respecto a la profundidad que deberían tener, segundo la diferencia de los contrastes entre el punto denominado (a) y el otro denominado (b)

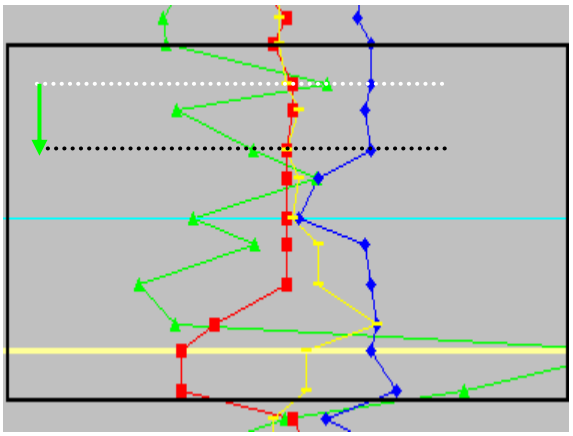
Figura 44. Análisis de sensibilidad en la superficie C3-D en pozo P3

Tal como se aprecia en la figura anterior los contrastes asociados al punto (b) son: un pico de en el registro de rayos gamma, un valle en el registro de densidad, un valle en el registro de resistividad y un valle en el registro de NPHI (correspondiente con un alto valor de porosidad debido a la inversión en la adquisición del mismo durante la cuantificación). Mientras que en el punto (a) se observan un pico en el registro de rayos gamma y en el registro de porosidad, así como un valle en el registro de densidad y de resistividad.

En el caso del punto (a) son coherentes con el patrón lutita sólo el registro de rayos gamma y el registro de resistividad, mientras que en el caso (b) son coherentes los registros de: rayos gamma, resistividad y porosidad, donde además los contrastes son mayores que en el caso anterior. Como consecuencia de lo anterior la confiabilidad en el punto (a) es muy inferior a la

encontrada en el punto (b) lo que en consecuencia implica una gran diferencia entre ellos y por tanto una alta sensibilidad. La cual, por tanto, es una medida del error en el modelo original.

Adicionalmente, en una revisión minuciosa se observa otro aspecto relevante: en ninguno de los dos casos anteriormente explicados existe una completa coherencia, de hecho en toda la ventana se observa una cierta incoherencia generalizada de los datos.

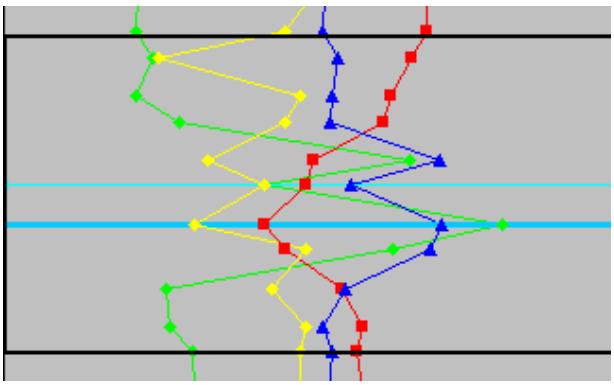


Obsérvese detalladamente la diferencia de profundidad entre las líneas punteadas de color blanco y negro que se muestran en la imagen de la izquierda. En un ejercicio visual si se pudiera mover el registro de rayos gamma una distancia equivalente a la separación entre las líneas punteadas en la dirección de la flecha (abajo) toda la secuencia de registros quedaría en perfecta coherencia.

Figura 45. Análisis de sincronización en la superficie C3-D en pozo P3

Los procedimientos empleados durante el presente trabajo especial de grado no incluyen la modificación de la relación entre la profundidad y los datos, sino en el uso directo de los mismos tal como fueron suministrados, por tanto se deduce que dicho error podría estar en los datos.

VII.7.2. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-B en el pozo P1

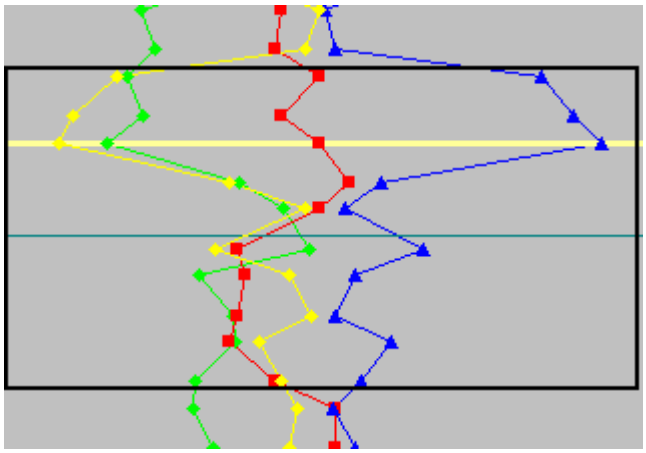


La profundidad donde el intérprete del modelo V-9 colocó la superficie de inundación corresponde con el punto medio entre dos zonas con un "patrón lutita" bien definido, donde todos los registros coinciden perfectamente, por lo que la diferencia de confiabilidad entre la posición original y la de nueva posición optimizada es muy grande.

Figura 46. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-B en el pozo P1

En el caso de la profundidad del modelo original los contrastes aunque perfectamente sincronizados están invertidos con respecto al patrón esperado, mientras que en el punto siguiente, en una profundidad muy cercana se encuentra un lugar de perfecta sincronización y además con patrones de lutita bien definidos.

VII.7.3. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-E (FS4) en el pozo P1



Obsérvese que en la figura de la izquierda los contrastes de porosidad y densidad son los únicos coherentes con el patrón lutita en la profundidad propuesta por el modelo optimizado, mientras que en el modelo original, salvo por un error menor de imprecisión, todos los registros son perfectamente coherentes con el patrón lutita, lo que es geológicamente hablando una mejor interpretación que la "optimizada".

Figura 47. Análisis de sensibilidad de la superficie C3-E en el pozo P1

En el caso del modelo original los contrastes tienen menos amplitud, razón por la cual a pesar de haber menos congruencia entre los registros con el patrón esperado el algoritmo colocó su profundidad en el lugar indicado anteriormente. Este caso es una representación de la necesidad de seguir mejorando el algoritmo hasta alcanzar un nivel más cercano a una correcta interpretación de la realidad geológica.

VII.8. MAPA DE SENSIBILIDAD MODIFICADA POR PESO DE LA DIFERENCIA DE PROFUNDIDAD

El mapa que se muestra a continuación es una extensión interpretada del anteriormente expuesto, donde se combinan la sensibilidad producto del análisis con la diferencia de profundidades promedio en cada uno de los pozos. Esta interpretación de los resultados en combinación se debe a que en dos casos con una sensibilidad parecida una variación importante de la profundidad uno de los casos es más grave que en otro donde la profundidad haya sido apenas corregida por unos pocos centímetros.

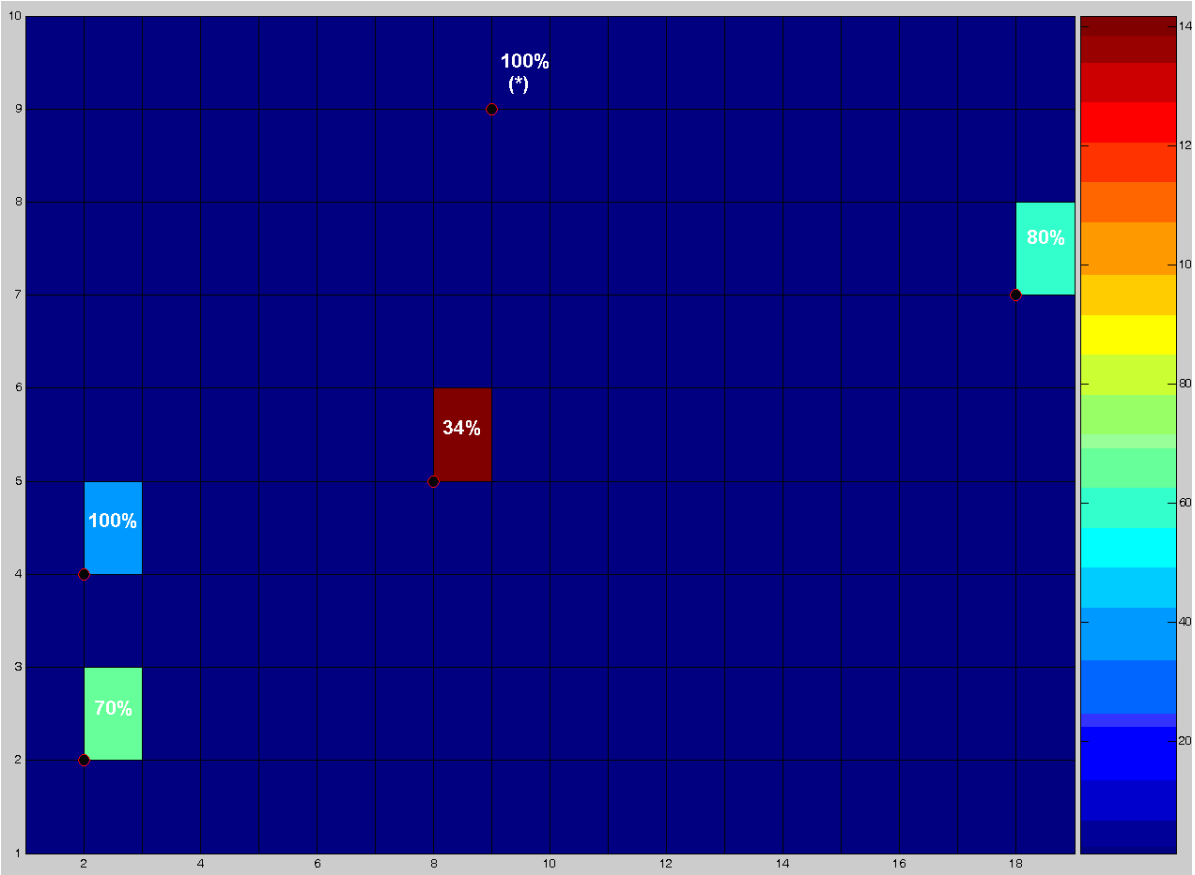


Figura 48. Mapa de sensibilidad aplicándole el peso de la diferencia de profundidad

Tal como se observa en la imagen anterior el pozo P3 (rojo) resalta como un pozo altamente sensible, ya que no sólo tiene imprecisiones a lo largo de su interpretación sino que además la diferencia de profundidad entre el modelo original y el modelo optimizado, es decir la posibilidad de que la distancia entre la profundidad expresada en el modelo y la posición real del tope de lutita sea grande es muy alta, a diferencia del pozo P1 y P5 (verdes) que a pesar de ser de

una sensibilidad media el impacto real en el modelo es mucho menor. Nótese como después de la aplicación de pesos en la interpretación de los resultados el pozo P4 desaparece dada su muy baja sensibilidad (azul oscuro), o lo que es lo mismo su alta confiabilidad, así mismo es evidente que el pozo P2 (azul) tiene una baja sensibilidad con respecto al resto del modelo de forma directa en su impacto.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VIII.1. CONCLUSIONES

La conceptualización de la Confiabilidad como un método para la identificación de lutitas a través de la Regla del Triángulo mostró ser efectiva, así también el procedimiento de minería de datos para determinar la relevancia de los distintos registros de pozos fue un elemento clave para la aplicación del concepto de Confiabilidad y para la determinación exitosa de los topes de lutita.

En el caso particular de la estratigrafía por secuencias, el uso de esta herramienta permitió la evaluación de todos los datos con un alto grado de estabilidad en los criterios, proporcionando resultados coherentes con la geología, reduciendo así el grado de error e incertidumbre en la interpretación del modelo estratigráfico.

La alta sensibilidad en los pozos puede deberse a errores inducidos por los datos y/o por el intérprete, así también una zona particularmente compleja puede reflejar una alta sensibilidad por lo que corregidos todos los posibles errores que se deben al modelo, es decir, tras un control efectivo sobre la calidad de los datos y la interpretación puede emplearse el análisis de sensibilidad para conocer la complejidad geológica de una zona, esta información permite planificar campañas de adquisición de datos con mayor eficiencia, enfocando los esfuerzos y recursos en aquellas áreas que requieran una mayor densidad de datos para construir un modelo de calidad.

Los resultados demuestran que la sensibilidad del modelo estratigráfico V-9 es debido a la calidad de los datos y a la interpretación de los diferentes profesionales. Proveer de una herramienta como la del presente trabajo especial de grado, a los geólogos encargados de la creación del modelo, permitirá discriminar tales efectos, estos constituye un aporte importante para PDVSA-INTEVEP, el cual podría emplear a futuro esta metodología como una valiosa herramienta para la creación de modelos de estratigrafía por secuencias.

De los 5 pozos que se estudiaron en el presente trabajo especial de grado, uno de ellos mostró una alta sensibilidad, dos una sensiblidad intermedia y otros dos una baja sensibilidad,

dicha sensibilidad es una medida del grado de error en cada pozo, por lo que pozos más confiables, es decir, menos sensibles tendrán menos errores y errores de menor gravedad que pozos más sensibles, es decir, menos confiables, en este último grupo resalta el pozo P3, el cual mostró una altisma sensibilidad con respecto a los demás del área.

VIII.2. RECOMENDACIONES

La presente metodología puede ser utilizada por diversos profesionales de la industria petrolera, comenzando por el departamento de geofísica con la finalidad de realizar un análisis similar con respecto a las interpretaciones de perfiles y cubos sísmicos. Es crítico que sea realizado por profesionales de la geofísica, ya que esta constituye una de las fases primarias de la exploración de yacimientos.

Con base en el algoritmo de la presente investigación se recomienda el desarrollo de un paquete informático más complejo que permita el estudio de cualquier zona, a través de la importación directa de los archivos .LAS para cada uno de los registros, así como la incorporación de los datos de núcleos para cubrir las deficiencias de los registros de pozos.

Se recomienda ampliamente la continuación de la presente investigación con miras al desarrollo de modelos de estratigrafía por secuencias, los cuales se proyecta que pueden ser obtenidos directamente y sin contar con un modelo previamente desarrollados. Con esta finalidad, sería ideal contar con un sistema de predicción o de generación aleatoria de datos sintéticos intercalados con datos reales a lo largo de las diferentes zonas de estudio. Así podrían estimarse con cierta precisión continuidad de secuencias, entre otras características.

Es pertinente recalcar que toda la metodología aquí desarrollada es altamente sensible a la calidad de los datos, cuyo tratamiento fue sumamente controlado por diversos investigadores durante el desarrollo de la presente investigación, por lo que se recomienda muy ampliamente que cualquier desarrollo a futuro sea hecho fundamentalmente sobre datos reales, los cuales deben ser revisados para garantizar su sincronización y obtener conclusiones confiables.

A futuro sería ideal ampliar esta metodología a margenes activos, es decir, zonas geológicamente más complicadas donde exista la presencia de fallas o cuya contexto geodinámico sea mucho más complicado, y tratar de predecir los sistemas depositacionales y los posibles modelos estratigráficos a futuro, esto podria dar indicios sobre rupturas de secuencias, pérdidas de hidrocarburos, migración, entre otros fenómenos.

Otra aplicación de la metodología aquí propuesta sería para tratar de predecir factores que controlan la geometría cuaternaria del área de estudio a través del uso de estratigrafía sísmica de alta resolución, la cual según estudios recientes permite conocer las variaciones de alta frecuencia que tuvo el nivel del mar, lo cual en combinación con la metodología aquí propuesta permitiría conocer en detalle la morfología de las secuencias y sistemas depositacionales.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, F. J. y. J. (N/A). Notas de Métodos Cuantitativos., Vol I, 1-87

BEICIP-FRANLAB, a. l. (2006). Sintesis Sedimentológica del Reservorio "Cretáceo", PDVSA INTEVEP: 24.

Cabrera, S. de y J. M. Villain, 1987. Bioestratigrafía y ambientes sedimentarias del Cretáceo Superior en el noreste de Guárico. Mem. *IV Jorn. Tecn. Corpoven*, Puerto La Cruz: 23 p.

Cai, H. y. (2011). "Building more realistic reservoir optimization models using data mining – A case study of Shelbyville Reservoir." Albert.

Catuneanu, O. (2006). Principles of Sequence Stratigraphy. Netherlands, 1era Edición. Elsevier. 375p

Di Croce, J. D. (1997). Analisis Sedimentologico de la Formacion San Juan en la Cuenca Oriental De Venezuela (estados Anzoategui y Monagas). Geología, Universidad Central de Venezuela. Trabajo de Ascenso de la categoría de Profesor Asistente a Profesor Agregado.

Dusenbury, Jr., A. N., 1960-a. The stratigraphy of the Cretaceous Temblador Group of the eastern Venezuela Basin. *Asoc. Venez. Geol., Min. y Petrol.,* Bol. Inform. 3(9): 246-257.

Escalona, N., 1985. Relaciones estratigráficas con el método de minerales pesados, Área Machete, Faja Petrolífera del Orinoco. Mem., *VI Congr. Geol. Venez.,* Caracas, Soc. Venezolana Geol., 1: 536-587.

González de Juana, C.; J. Iturralde de Arozena y X. Picard, 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas.* Caracas, Ed. Foninves, 2 tomos. 1021 p.

Hedberg, H. D., y H. J. Funkhouser, 1947. Oilfields of the Greater Oficina Area, central Anzoátegui, Venezuela. *Amer. Assoc. Petrol. Geol.,* 31(12): 2089-2169.

INTEVEP, p. (2002). Modelo estratigrafico V-9 (Naricual Superior-Inferior, Cretaceo) campo El Furrial. Confidencial pdvsa: 67p.

Isea, A., 1987. Geologycal syntesis of the Orinoco Oil Belt, Eastern Venezuela. *Journal of Petroleum Geology*, 10(2): 135-148.

Koutsoukos, E. (2007). Applied Stratigraphy. Netherlands, Springer.

Martin, J. M., Ph.D. (2007). Quantitative sequence stratigraphy

Mendoza, D. V. (2005). Geología de Venezuela - Cretácico, Terciario y Reciente sedimentario de Venezuela.

Papers, C. (2010). "Study on Tectonic Evolution and Sequence Stratigraphy and Hidden Traps for Petroleum in Dongtumo District of the Songliao Basin." China Papers.

Patterson, J. M. y J. G. Wilson, 1953. Oil fields of Mercedes region, Venezuela, *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.,* 37(12): 2705-2733.

Rapševičius, J. y. (2001). "Panelamiento utilización una construcción de Árbol de Decisiones."

Schlumberger, Principios / Aplicaciones de la Interpretación de Registros, sin fecha.

Sharma, A. K. (2006). Quantitative Stratigraphic Inversion. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Sociedad Venezolana de Ingenieros de Petróleo, 1963. Aspectos de la industria petrólera en Venezuela. I Congr. Venez. Petról., Caracas, 1962, 850 p. (Cuadro de Correlación entre pág. 188-189). Reimpreso en: Asoc. Venez. Geol., Min. y Petrol., Bol. Inform., 1963, 6(11); 1964, 7

Torres, J. A. V. (1994). Estratigrafia: Principios Y Metodos. 1era Edición, 828p

Van Erve, A., 1985. Palinoflora del Jurásico del pozo NZZ-108X en el área de Zuata, Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela oriental. Mem. *VI Congr. Geol. Venezolano*, Caracas, Soc. Venezolana Geol., 2: 1205-1209

Vega, A. e I. de Rojas, 1987. Exploration and evaluation of the Zuata area, Orinoco Oil Belt, Venezuela, *Jour. Petr. Geol, London*, 10(2): 163-176.

Zhang, T., L. Li and B. Zheng (2009). "Partial least squares modeling of Hyperion image spectra for mapping agricultural soil properties." SPE 7454.

ANEXOS

- **Anexo I: Código Fuente en Matlab**
- **Anexo II: Cartas sedimentológicas disponibles**

X.1. CODIGO FUENTE HECHO EN MATLAB

```
warning off; clear;
ExS=xlsread('C:\Documents and Settings\Geomatica\My Documents\TESIS EFRAIN\Quinta Etapa\estratigrafic db.xls','ExS','b3:f9');
[r_e c_e]=size(ExS);
pozos=zeros(2,2,2);
for i=1:5 %//////////// Apunta al pozo
  limo=xlsread('C:\Documents and Settings\Geomatica\My Documents\TESIS EFRAIN\Quinta Etapa\well db-soloSK3.xls',i,'a:a');
  [r c]=size(limo);
  true_r(i)=r;
  rango=strcat('a2:e',num2str(r+1));
  p=xlsread('C:\Documents and Settings\Geomatica\My Documents\TESIS EFRAIN\Quinta Etapa\well db-soloSK3.xls',i,rango);
  for j=1:r %//////// Apunta a la cantidad de filas
    for k=1:5 %//// Apunta al registro 1: cota, 2: gamma, 3: resist, 4: dens, 5: poro
      pozos(j,k,i)=p(j,k);
    end
  end
end

for i=1:5
  for j=1:r_e
    aux=min(find(pozos(:,1,i)>ExS(j,i)))-1;
    [r_aux c_aux]=size(aux);
    if r_aux>0
      ExS_i(j,i)=aux;
    else
      ExS_i(j,i)=0;
    end
  end
```

```
end
ventana=zeros(7,5);

%////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN GAMMA RAY
%//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
for mi_pozo=1:5
   for mi_super=1:7
      if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
         if ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 && ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
            punto_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo);
            arrib_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo);
            abajo_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo);
            if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
               z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
               z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
               while ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                  if pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,2,mi_pozo)
                     z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                  else
                     break;
                  end
               end
               while ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                  if
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+
z_d(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo)
                     z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                  else
```

```
                    break;
                end
            end
        end
    end
  end
end

mi_reg=1;
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
      a=ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
      b=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
      ma=max(pozos(a:b,2,mi_pozo));
      mi=min(pozos(a:b,2,mi_pozo));
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/150; % Contraste Gamma
    else
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
    end

ventana(mi_super,mi_pozo)=max(ventana(mi_super,mi_pozo),max(z_i(mi_super,mi_pozo),z_d(mi_super
,mi_pozo)));
  end
end
%////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN RESISTIVIDAD
%//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
      if ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 && ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
        punto_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo);
        arrib_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo);
```

```
                abajo_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1,3,mi_pozo);
                if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                  z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                  z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                  while ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                    if pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,3,mi_pozo)
                      z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                    else
                      break;
                    end
                  end
                  while ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                    if
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+
z_d(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo)
                      z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                    else
                      break;
                    end
                  end
                end
              end
            end
          end
        end

        mi_reg=2;
        for mi_pozo=1:5
          for mi_super=1:7
```

```
            if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
                a=ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
                b=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
                ma=max(pozos(a:b,3,mi_pozo));
                mi=min(pozos(a:b,3,mi_pozo));
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/2000; % Contraste RESISTIVIDAD
            else
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
            end

ventana(mi_super,mi_pozo)=max(ventana(mi_super,mi_pozo),max(z_i(mi_super,mi_pozo),z_d(mi_super
,mi_pozo)));
        end
    end
    %////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN DENSIDAD
    %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
    z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
    for mi_pozo=1:5
        for mi_super=1:7
            if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
                if ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 && ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                    punto_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo);
                    arrib_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo);
                    abajo_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1,4,mi_pozo);
                    if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                        z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                        while ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                            if pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,4,mi_pozo)
                                z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
```

```
                    else
                        break;
                    end
                end
                while   ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0                    &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                    if
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+
z_d(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo)
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                    else
                        break;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

mi_reg=3;
for mi_pozo=1:5
    for mi_super=1:7
        if      z_i(mi_super,mi_pozo)>0      &&      z_d(mi_super,mi_pozo)>0      &&
ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
            a=ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
            b=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
            ma=max(pozos(a:b,4,mi_pozo));
            mi=min(pozos(a:b,4,mi_pozo));
            contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi); % Contraste Densidad
        else
            contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
        end
```

```
ventana(mi_super,mi_pozo)=max(ventana(mi_super,mi_pozo),max(z_i(mi_super,mi_pozo),z_d(mi_super
,mi_pozo)));
        end
    end
    %////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN POROSIDAD
    %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
    z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
    for mi_pozo=1:5
        for mi_super=1:7
            if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
                if ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 && ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                    punto_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo);
                    arrib_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo);
                    abajo_marca=pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-1,5,mi_pozo);
                    if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                        z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                        while ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                            if pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,5,mi_pozo)
                                z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                            else
                                break;
                            end
                        end
                        while ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                            if
pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_i(mi_super,mi_pozo)+
z_d(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo)
```

```
                    z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                else
                    break;
                end
            end
        end
    end
  end
end
mi_reg=4;
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 && ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
      a=ExS_i(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
      b=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
      ma=max(pozos(a:b,5,mi_pozo));
      mi=min(pozos(a:b,5,mi_pozo));
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/0.60; % Contraste RESISTIVIDAD
    else
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
    end

ventana(mi_super,mi_pozo)=max(ventana(mi_super,mi_pozo),max(z_i(mi_super,mi_pozo),z_d(mi_super,mi_pozo)));
  end
end
max_move=max(max(ventana));
%////////////////// Calculo de los COEFICIENTES para los registros de pozo
c_gr=sum(sum(contraste(:,1,:)));
c_re=sum(sum(contraste(:,2,:)));
c_de=sum(sum(contraste(:,3,:)));
c_po=sum(sum(contraste(:,4,:)));
tot=c_gr+c_re+c_de+c_po;
```

```
c_gr=c_gr/tot;
c_re=c_re/tot;
c_de=c_de/tot;
c_po=c_po/tot;
mi=min([c_gr c_re c_de c_po]);
c_gr=c_gr/mi;
c_re=c_re/mi;
c_de=c_de/mi;
c_po=c_po/mi;
for mi_pozo=1:5
   for mi_super=1:7

confianza(mi_super,mi_pozo)=contraste(mi_super,1,mi_pozo)*c_gr+contraste(mi_super,2,mi_pozo)*c_re
+contraste(mi_super,3,mi_pozo)*c_de+contraste(mi_super,4,mi_pozo)*c_po;
   end
end

ubica=xlsread('C:\Documents and Settings\Geomatica\My Documents\TESIS EFRAIN\Quinta
Etapa\ubicacion pozos.xls',1,'u5:v9');
figure(6);
x=ubica(:,1)-442000;
y=ubica(:,2)-1067000;
axis([442000 460000 1067000 1074000]);
x=round(x./100);
y=round(y./100);
scatter(442000+x*100,1067000+y*100,'s');
for mi_super=2:6
   for mi_pozo=1:5
      mapa_confianza(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)=confianza(mi_super,mi_pozo);
   end
end
%////////////////////// Aquí comienza el análisis de sensibilidad
%*****************************************************************************
%*****************************************************************************
mi_ExS=zeros(7,5);
sen_confianza=confianza; modelo=0;
```

```
cf_gr=0; cf_re=0; cf_de=0; cf_po=0;
%////////////////////////////////////////////////////////////////////////
%////////////////////// Aqui se calculan los coef ////////////////////////
%////////////////////////////////////////////////////////////////////////
%//////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN GAMMA RAY
%//////////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
for polo=-1:1 %//////////////////////////// Primero a la izquierda luego derecha
   for mueve=1:max_move %///// Con esto muevo la superficie
      mi_confianza=zeros(7,5);
      contraste=zeros(7,4,5);
      ExS_aux=ExS_i;
      for mi_pozo=1:5 %////////////////////// Apunta a la superficie
         for mi_super=1:7 %/////////////// Apunta al pozo
            if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
               ExS_aux(mi_super,mi_pozo)=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+polo*mueve;
            else
               ExS_aux(mi_super,j)=ExS_i(mi_super,mi_pozo);
               break
            end
            if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>r
               ExS_aux(mi_super,mi_pozo)=r;
            end
         end
      end
            %//////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN GAMMA RAY
      %//////////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
      z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
      for mi_pozo=1:5
         for mi_super=1:7
            if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
               if                    ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0                    &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                  punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo);
                  arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo);
                  abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo);
```

```
                    if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                        z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                        while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                            if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,2,mi_pozo)
                                z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                            else
                                break;
                            end
                        end
                        while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                            if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo)
                                z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                            else
                                break;
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    mi_reg=1;
    for mi_pozo=1:5
        for mi_super=1:7
```

```
                if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                    a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
                    b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
                    ma=max(pozos(a:b,2,mi_pozo));
                    mi=min(pozos(a:b,2,mi_pozo));
                    contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/150; % Contraste Gamma
                else
                    contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
                end
            end
        end
        %////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN RESISTIVIDAD
        %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
        z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
        for mi_pozo=1:5
            for mi_super=1:7
                if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                    if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                        punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo);
                        arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo);
                        abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,3,mi_pozo);
                        if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                            z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                            z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                            while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                                if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,3,mi_pozo)
                                    z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                                else
                                    break;
```

```
                end
            end
            while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo)
                    z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                else
                    break;
                end
            end
        end
      end
    end
  end
end
mi_reg=2;
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
      a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
      b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
      ma=max(pozos(a:b,3,mi_pozo));
      mi=min(pozos(a:b,3,mi_pozo));
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/2000; % Contraste
RESISTIVIDAD
    else
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
    end
  end
end
```

```
%////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN DENSIDAD
%//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
for mi_pozo=1:5
   for mi_super=1:7
      if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
         if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
            punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo);
            arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo);
            abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,4,mi_pozo);
            if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
               z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
               z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
               while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                  if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,4,mi_pozo)
                     z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
                  else
                     break;
                  end
               end
               while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                  if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo)
                     z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                  else
                     break;
```

```
                end
            end
        end
    end
  end
end
mi_reg=3;
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
      a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
      b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
      ma=max(pozos(a:b,4,mi_pozo));
      mi=min(pozos(a:b,4,mi_pozo));
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi); % Contraste Densidad
    else
      contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
    end
  end
end
%////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN POROSIDAD
%//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
for mi_pozo=1:5
  for mi_super=1:7
    if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
      if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
        punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo);
        arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo);
        abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,5,mi_pozo);
        if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
          z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
```

```
z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,5,mi_pozo)
z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo)
z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
end
end
end
end
end
mi_reg=4;
for mi_pozo=1:5
for mi_super=1:7
if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
```

```
                ma=max(pozos(a:b,5,mi_pozo));
                mi=min(pozos(a:b,5,mi_pozo));
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/0.60;          %          Contraste
RESISTIVIDAD
            else
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
            end
          end
        end
        %////////////////// Calculo de los COEFICIENTES para los registros de pozo
        c_gr=sum(sum(contraste(:,1,:)));
        c_re=sum(sum(contraste(:,2,:)));
        c_de=sum(sum(contraste(:,3,:)));
        c_po=sum(sum(contraste(:,4,:)));

        cf_gr=cf_gr+c_gr;
        cf_re=cf_re+c_re;
        cf_de=cf_de+c_de;
        cf_po=cf_po+c_po;

      end %<---------------------- mueve
    end %<-------------------------- polo

        tot=cf_gr+cf_re+cf_de+cf_po;

        c_gr=cf_gr/tot;
        c_re=cf_re/tot;
        c_de=cf_de/tot;
        c_po=cf_po/tot;

        mi=min([c_gr c_re c_de c_po]);
        c_gr=c_gr/mi;
        c_re=c_re/mi;
        c_de=c_de/mi;
        c_po=c_po/mi;
```

```
%////////////////////////////////////////////////////////////////////////
%////////////////////// Aqui se calcula el modelo ///////////////////////
%////////////////////////////////////////////////////////////////////////

%/////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN GAMMA RAY
%//////////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)

for polo=-1:1 %/////////////////////////// Primero a la izquierda luego derecha
   for mueve=1:max_move %///// Con esto muevo la superficie
      mi_confianza=zeros(7,5);
      contraste=zeros(7,4,5);
      ExS_aux=ExS_i;
      for mi_pozo=1:5 %//////////////////// Apunta a la superficie
         for mi_super=1:7 %/////////////// Apunta al pozo
            if ExS_i(mi_super,mi_pozo)>0
               ExS_aux(mi_super,mi_pozo)=ExS_i(mi_super,mi_pozo)+polo*mueve;
            else
               ExS_aux(mi_super,j)=ExS_i(mi_super,mi_pozo);
               break
            end
            if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>r
               ExS_aux(mi_super,mi_pozo)=r;
            end
         end
      end

      %/////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN GAMMA RAY
      %//////////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
      z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
      for mi_pozo=1:5
         for mi_super=1:7
            if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
               if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                  punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo);
                  arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo);
```

```
abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo);
if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 && arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 && pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 && pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)
z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&& pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 && pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,2,mi_pozo)
z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
end
end
end
end
end

mi_reg=1;
for mi_pozo=1:5
```

```
            for mi_super=1:7
              if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
                b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
                ma=max(pozos(a:b,2,mi_pozo));
                mi=min(pozos(a:b,2,mi_pozo));
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/150; % Contraste Gamma
              else
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
              end
            end
          end
          %////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN RESISTIVIDAD
          %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)

          z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
          for mi_pozo=1:5
            for mi_super=1:7
              if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
                  punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo);
                  arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo);
                  abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,3,mi_pozo);
                  if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
                    z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
                    z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
                    while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                      if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,3,mi_pozo)
                        z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
```

```
                    else
                        break;
                    end
                end
                while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
                    if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),3,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,3,mi_pozo)
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                    else
                        break;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

mi_reg=2;
for mi_pozo=1:5
    for mi_super=1:7
        if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
            a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
            b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
            ma=max(pozos(a:b,3,mi_pozo));
            mi=min(pozos(a:b,3,mi_pozo));
            contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/2000; % Contraste
RESISTIVIDAD
        else
            contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
        end
```

```
    end
  end

  %////////////////////////// DETECTAR LOS PICOS EN DENSIDAD
  %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)

  z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
  for mi_pozo=1:5
    for mi_super=1:7
      if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
        if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
          punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo);
          arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo);
          abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,4,mi_pozo);
          if punto_marca>max(arrib_marca,abajo_marca) && punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
            z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
            z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
            while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
              if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,4,mi_pozo)
                z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
              else
                break;
              end
            end
            while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
```

```
                    if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),4,mi_pozo)>pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,4,mi_pozo)
                        z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
                    else
                        break;
                    end
                  end
                end
              end
            end
          end

          mi_reg=3;
          for mi_pozo=1:5
            for mi_super=1:7
              if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
                b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
                ma=max(pozos(a:b,4,mi_pozo));
                mi=min(pozos(a:b,4,mi_pozo));
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi); % Contraste Densidad
              else
                contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
              end
            end
          end

          %////////////////////////// DETECTAR LOS VALLES EN POROSIDAD
          %//////////////////////////////(CRITERIO DEL TRIANGULO)
          z_d=zeros(7,5);z_i=zeros(7,5);
          for mi_pozo=1:5
            for mi_super=1:7
              if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
```

```
if ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)
punto_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo);
arrib_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo);
abajo_marca=pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-1,5,mi_pozo);
if punto_marca<min(arrib_marca,abajo_marca)&& punto_marca~=0 &&
arrib_marca~=0 && abajo_marca~=0
z_i(mi_super,mi_pozo)=1;
z_d(mi_super,mi_pozo)=1;
while ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-
z_i(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-
1,5,mi_pozo)
z_i(mi_super,mi_pozo)=z_i(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
while
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1<=true_r(mi_pozo)&&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo),2,mi_pozo)>0 &&
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo)-1,2,mi_pozo)>0
if
pozos(ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo),5,mi_pozo)<pozos(ExS_aux(mi_super,mi_p
ozo)+z_d(mi_super,mi_pozo)+1,5,mi_pozo)
z_d(mi_super,mi_pozo)=z_d(mi_super,mi_pozo)+1;
else
break;
end
end
end
end
end
end
```

```
            end

            mi_reg=4;
            for mi_pozo=1:5
              for mi_super=1:7
                if z_i(mi_super,mi_pozo)>0 && z_d(mi_super,mi_pozo)>0 &&
ExS_aux(mi_super,mi_pozo)>0
                  a=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)-z_i(mi_super,mi_pozo);
                  b=ExS_aux(mi_super,mi_pozo)+z_d(mi_super,mi_pozo);
                  ma=max(pozos(a:b,5,mi_pozo));
                  mi=min(pozos(a:b,5,mi_pozo));
                  contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=abs(ma-mi)/0.60; % Contraste
RESISTIVIDAD
                else
                  contraste(mi_super,mi_reg,mi_pozo)=0;
                end
              end
            end

            %////////////////// COEFICIENTES para el cálculo de confianza

            for mi_pozo=1:5
              for mi_super=1:7

mi_confianza(mi_super,mi_pozo)=contraste(mi_super,1,mi_pozo)*c_gr+contraste(mi_super,2,mi_pozo)*
c_re+contraste(mi_super,3,mi_pozo)*c_de+contraste(mi_super,4,mi_pozo)*c_po;
                if mi_confianza(mi_super,mi_pozo)>sen_confianza(mi_super,mi_pozo)
                  sen_confianza(mi_super,mi_pozo)=mi_confianza(mi_super,mi_pozo);
                  mi_ExS(mi_super,mi_pozo)=ExS_aux(mi_super,mi_pozo);
                end
              end
            end

          end %<---------------------- mueve
        end %<-------------------------- polo
```

```
for mi_pozo=1:5
   for mi_super=1:7
      if mi_ExS(mi_super,mi_pozo)==0
         mi_ExS(mi_super,mi_pozo)=ExS_aux(mi_super,mi_pozo);
      end
   end
end

for mi_super=1:7
   for mi_pozo=1:5
      if mi_ExS(mi_super,mi_pozo)>0
         mis_valores(mi_super,mi_pozo)=pozos(mi_ExS(mi_super,mi_pozo),1,mi_pozo);
      end
   end
end
xlswrite('C:\Documents and Settings\Geomatica\My Documents\TESIS EFRAIN\Quinta Etapa\estratigrafic db.xls',mis_valores(2:6,:),'ExS','b12:f17');

for mi_super=2:6
   for mi_pozo=1:5

sen_mapa_confianza(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)=sen_confianza(mi_super,mi_pozo);

residual(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)=sen_mapa_confianza(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)-mapa_confianza(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super);
      if residual(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)>100
         residual(x(mi_pozo),y(mi_pozo),mi_super)=100;
      end
   end
   %figure(mi_super)
   %pcolor(residual(:,:,mi_super))
end
for mi_super=2:6
   figure(mi_super)
   bar(sen_confianza(mi_super,:)-confianza(mi_super,:));
end
```

X.2. CARTAS SEDIMENTOLÓGICAS DISPONIBLES

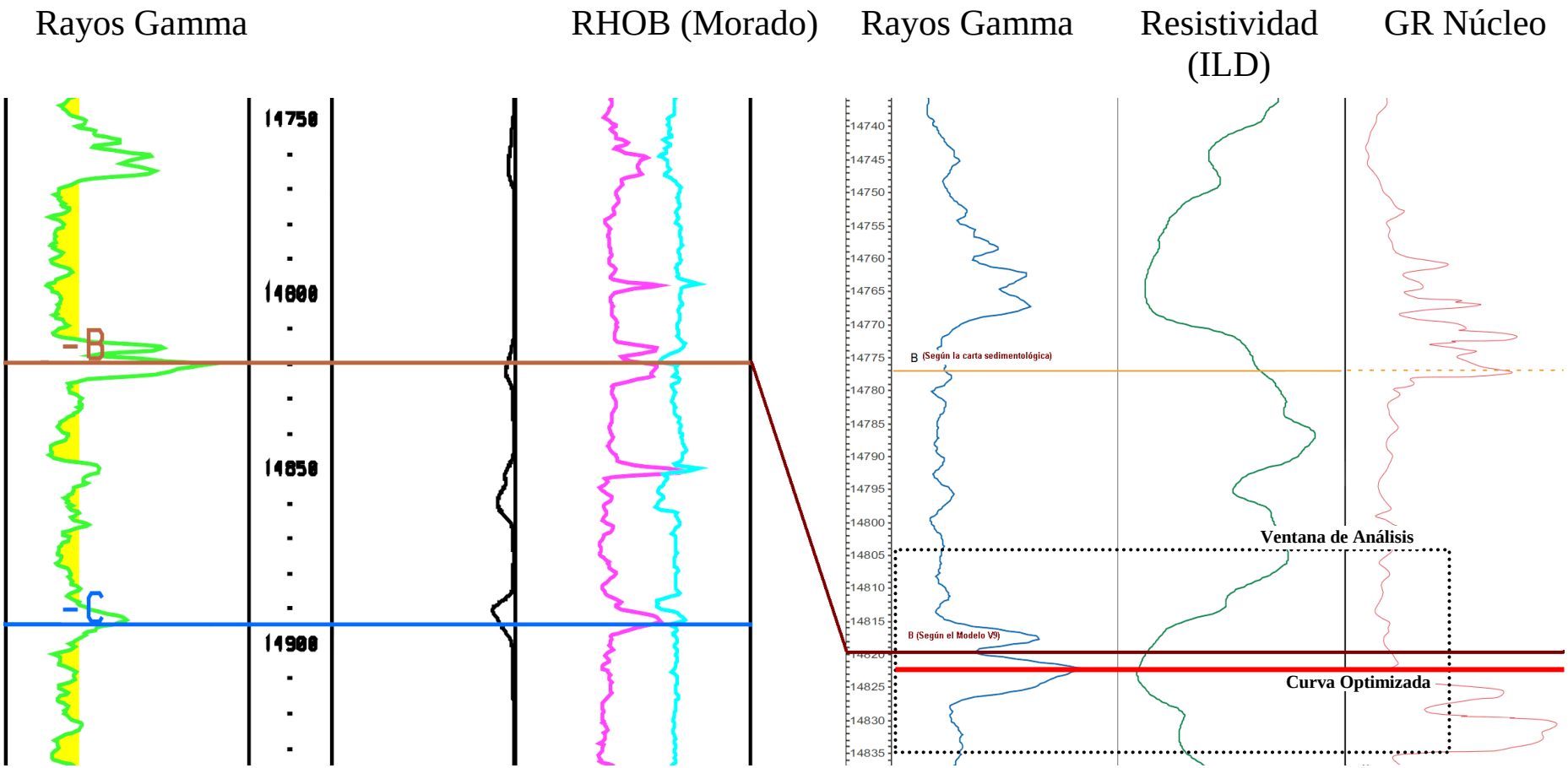


Figura 49. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P1

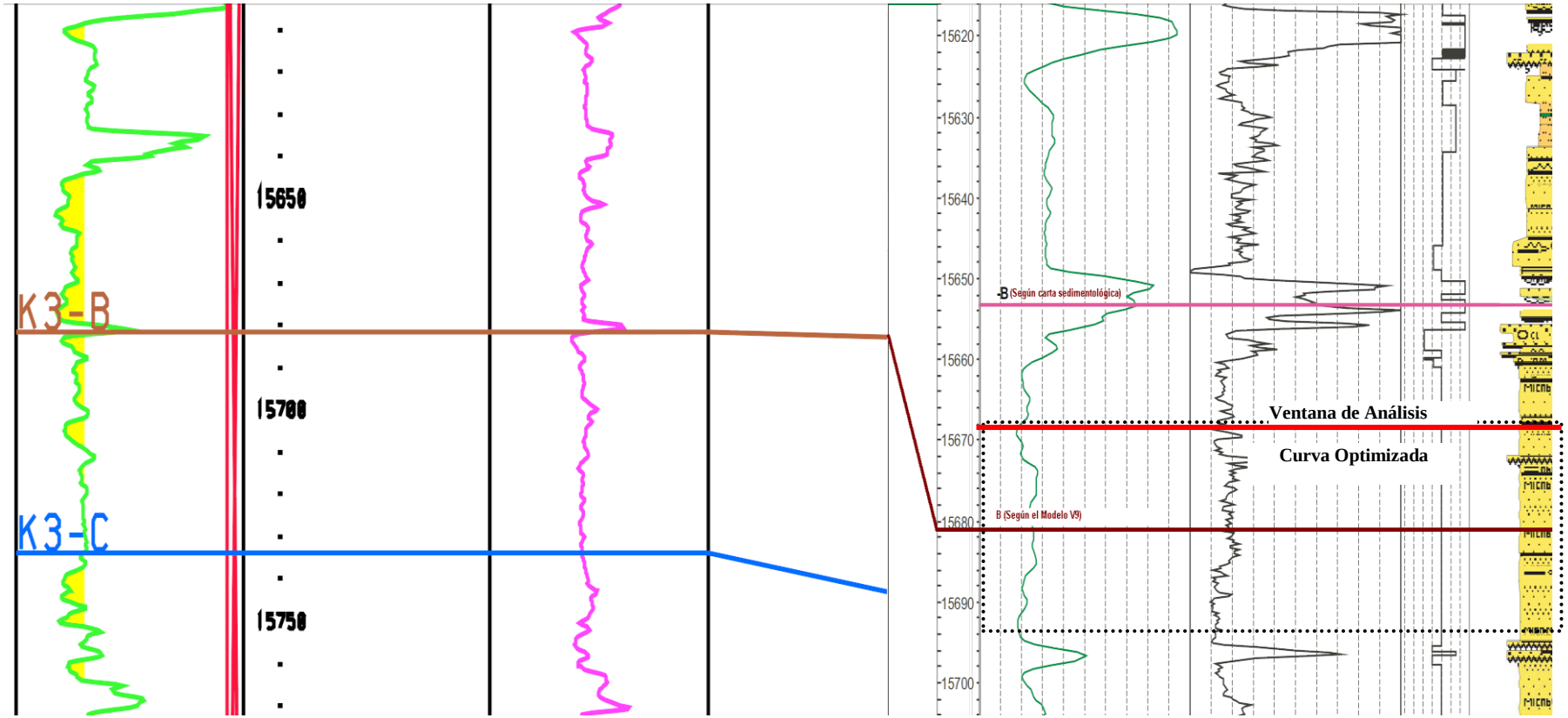


Figura 50. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie B)

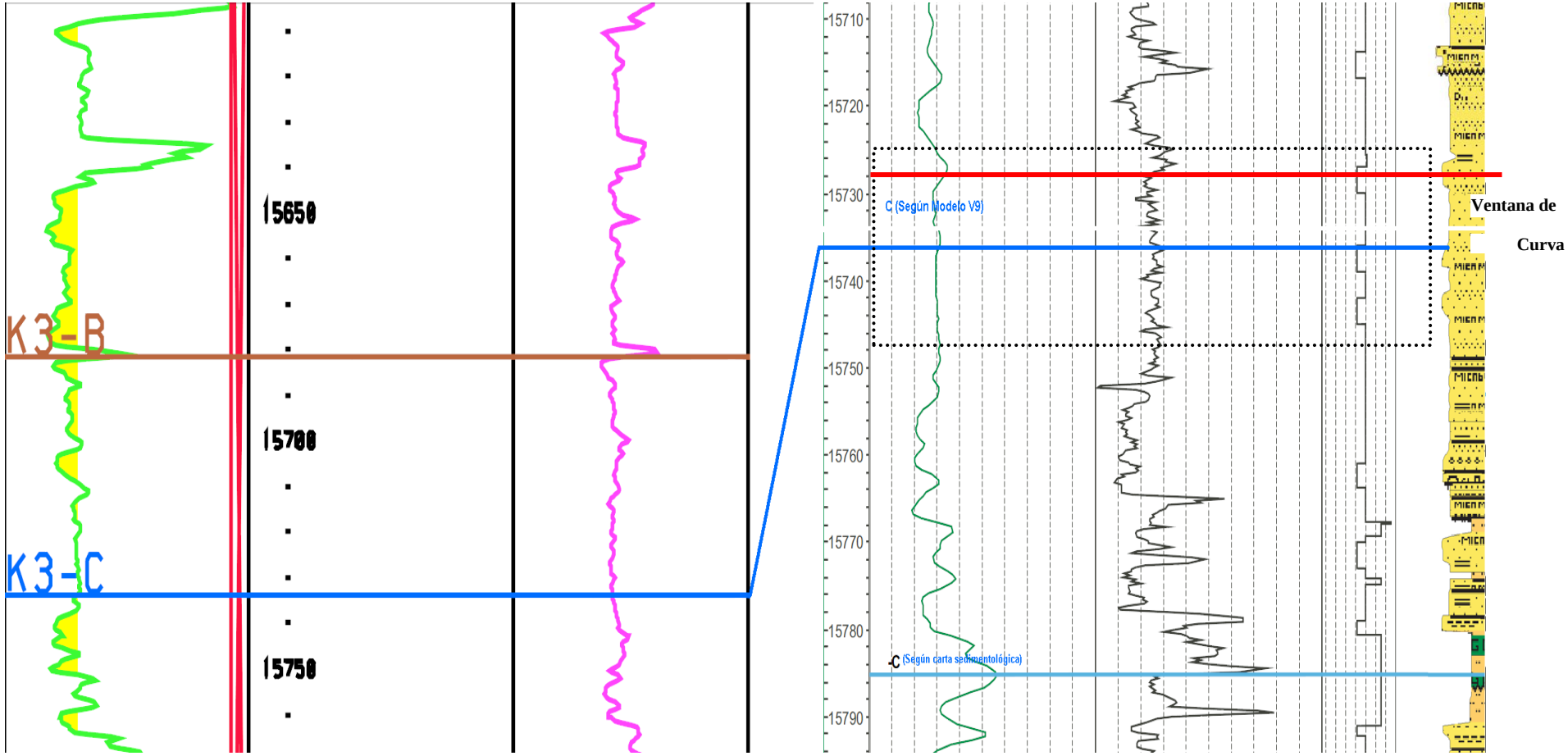


Figura 51. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie C)

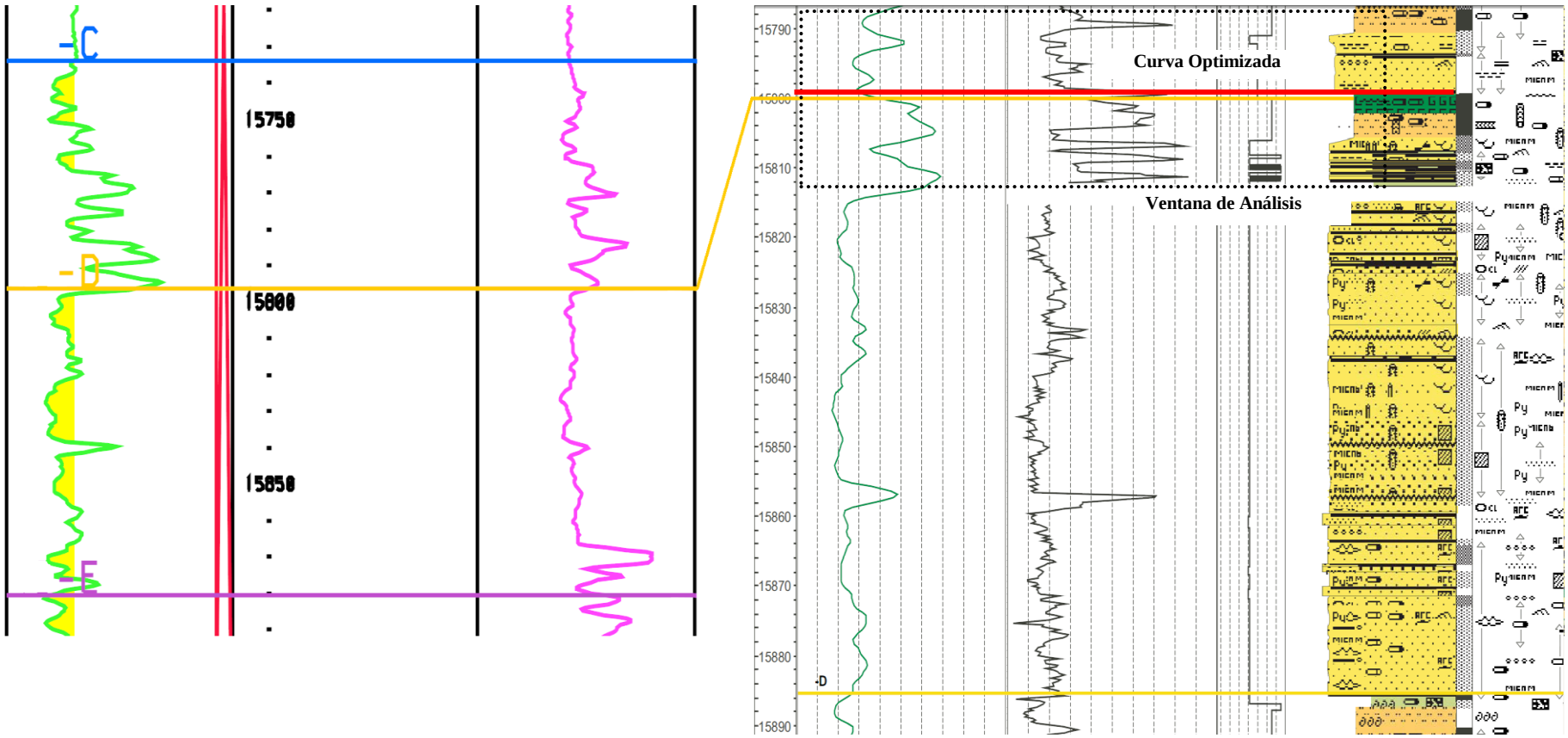


Figura 52. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P2 (Superficie D)

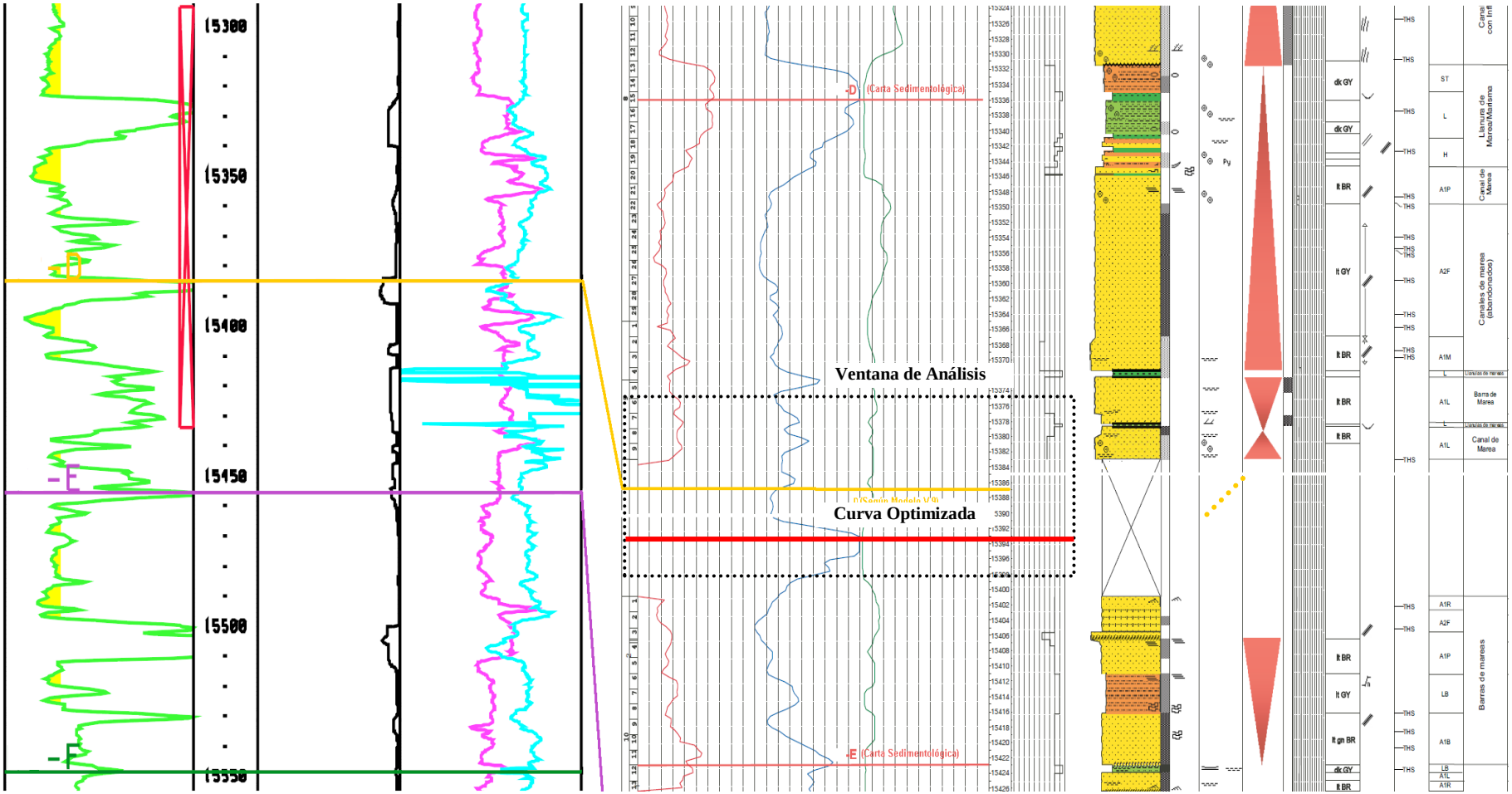


Figura 53. Comparación entre la sección anexo del informe correspondiente al Modelo V-9 y la carta sedimentológica del núcleo perteneciente al pozo P3