

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



## Modelado Geoquímico 2D en el Sur de la Cuenca de Maracaibo

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA POR LA BR. MARLYN ARELLÁN  
COMO REQUISITO DE LA MATERIA PROYECTO GEOQUÍMICO II Y PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN GEOQUÍMICA.

**Caracas, Octubre 2008**

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es la realización de un modelado 2D en el sur de la Cuenca de Maracaibo, con la utilización de los datos de 21 pozos y 6 pozos virtuales. Estos datos fueron obtenidos por Llanos en el año 2000. El modelado fue realizado haciendo uso de un programa denominado Basinmod 2D proporcionado por la Platte Rivers Associates, y a su vez para la realización de mapas fue usado Basinview.

La estratigrafía fue reconstruida con la finalidad de poder establecer la sección transversal a modelar, con base a los pozos que poseen la mayor cantidad de información: litológica (% de lutitas, limolitas, areniscas, caliza, dolomita), geoquímica (% Madurez (%Ro), carbono orgánico total (%COT)) e historia geológica de la zona. A través del proceso de calibración utilizando los datos de madurez, se estableció el flujo de calor para la zona de estudio  $30 \text{ mW/m}^2$

A partir de la integración de los resultados obtenidos por el modelo y la interpretación geológica de la zona, fue determinada la madurez de la roca madre, comparando resultados obtenidos de pozos ubicados a una baja y alta profundidad, así como también la etapa de mayor generación de hidrocarburos y la edad de expulsión.

Las tendencias de las diferentes vías de migración de los hidrocarburos fueron establecidas a diferentes profundidades, para las distintas facies del petróleo.

# Índice

|                                                                                 | Página |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Introducción.....                                                               | 1      |
| Objetivos Específicos.....                                                      | 2      |
| Área de estudio.....                                                            | 3      |
| Estudios Previos.....                                                           | 4      |
| Marco Teórico.....                                                              | 5      |
| Sistema Petrolero.....                                                          | 5      |
| Roca Madre, alteración, clasificación y cantidad de la materia orgánica.....    | 7      |
| Roca reservorio o yacimiento, roca sello y sobrecarga de roca.....              | 12     |
| Procesos del sistema petrolero.....                                             | 14     |
| Modelado de la generación-expulsión-migración-acumulación de hidrocarburos..... | 15     |
| Tiempo de preservación.....                                                     | 16     |
| Eventos del sistema petrolero.....                                              | 16     |
| Importancia en la Evaluación de Riesgos del Sistema Petrolero.....              | 18     |
| Modelos predictivos.....                                                        | 18     |
| Historia de soterramiento.....                                                  | 19     |
| Modelado termal considerando el flujo de calor.....                             | 20     |
| Modelado de la generación, expulsión y migración de hidrocarburos....           | 22     |
| Procesos generados por los modelos.....                                         | 27     |
| Geología regional.....                                                          | 32     |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Sedimentación .....                                                | 32 |
| Tectónica.....                                                     | 37 |
| Geoquímica regional.....                                           | 40 |
| Metodología.....                                                   | 42 |
| Búsqueda inicial de la información y recopilación de<br>datos..... | 42 |
| Modelado de pozos (reales y ficticios).....                        | 46 |
| Selección de pozos y de la sección<br>transversal.....             | 47 |
| Calibración del modelo.....                                        | 48 |
| Consideraciones para el modelado<br>.....                          | 50 |
| Cinética de La Luna.....                                           | 51 |
| Discusión y análisis de<br>resultados.....                         | 52 |
| Diagramas de soterramiento.....                                    | 54 |
| Diagramas de generación y expulsión en el<br>tiempo.....           | 57 |
| Modelado 2D de la madurez.....                                     | 59 |
| Modelado 2D de la<br>migración.....                                | 60 |
| Conclusiones.....                                                  | 6  |
| 2                                                                  |    |
| Recomendaciones.....                                               | 64 |

## Lista de figuras

|   |                                                                                                                          |   |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1 | Área de Estudio.....                                                                                                     | 3 |
| 2 | Extensión geográfica de un Sistema Petrolero.....                                                                        | 6 |
| 3 | Esquema general de la formación de hidrocarburos en función de la<br>profundidad de soterramiento de la roca fuente..... | 9 |

|    |                                                                                                                                                                             |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4  | Diagrama de Van Krevelen, que muestra la relación entre el tipo de materia orgánica y los estados de evolución termal, así como los productos generados en cada estado..... | 10 |
| 5  | Diagrama de eventos del sistema petrolero.....                                                                                                                              | 17 |
| 6  | Madurez termal actual, calibración.....                                                                                                                                     | 28 |
| 7  | Generación de hidrocarburos para el tope y la base de la formación...29                                                                                                     |    |
| 8  | Vías de migración.....                                                                                                                                                      | 30 |
| 9  | Curvas de calibración.....                                                                                                                                                  | 31 |
| 10 | Búsqueda de la información.....                                                                                                                                             | 42 |
| 11 | Ubicación de pozos.....                                                                                                                                                     | 43 |
| 12 | Datos de entrada para el modelado.....                                                                                                                                      | 45 |
| 13 | Mapa de ubicación de la sección transversal.....                                                                                                                            | 46 |
| 14 | Resultados obtenidos a partir del programa Basinmod 1D y 2D.....                                                                                                            | 47 |
| 15 | Graficación de los BHT, para cada uno de los pozos.....                                                                                                                     | 48 |
| 16 | Calibración Pozo A1.....                                                                                                                                                    | 49 |
| 17 | Gráfica de la cinética correspondiente al grupo C.....                                                                                                                      | 51 |
| 18 | Diagrama de soterramiento Pozo A2.....                                                                                                                                      | 55 |
| 19 | Diagrama de soterramiento Foredeep.....                                                                                                                                     | 56 |
| 20 | Diagrama de generación y expulsión Foredeep.....                                                                                                                            | 57 |
| 21 | Diagrama de generación y expulsión Pozo B2.....                                                                                                                             | 58 |
| 22 | Sección transversal .Modelado 2D de la madurez.....                                                                                                                         | 60 |
| 23 | Delineación de las rutas de migración. Modelado 2D.....                                                                                                                     | 61 |

## Lista de tablas

|   |                                                                      |    |
|---|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Tipo de Querógeno, según su origen y potencial de hidrocarburos..... | 11 |
| 2 | Resumen de datos.....                                                | 54 |

## **Anexos**

### **Mapas de Espesores**

|                 |                      |    |
|-----------------|----------------------|----|
| Anexo 1.1       | Río Negro.....       | 71 |
| Anexo 1.3       | Grupo Cogollo.....   | 74 |
| Anexo 1.6       | Colón/Mito Juan..... | 78 |
| Anexo 1.8       |                      |    |
| Paleoceno.....  |                      | 80 |
| Anexo 1.10      | Misoa.....           | 82 |
| Anexo 1.12      | Oligoceno.....       | 84 |
| Anexo 1.14      | La                   |    |
| Rosa.....       |                      | 86 |
| Anexo 1.16      |                      |    |
| Lagunillas..... |                      | 88 |
| Anexo 1.18      | La Puerta.....       | 90 |
| Anexo 1.20      | Onia-Reciente.....   | 92 |

### **Mapas Litológicos**

|                |                      |    |
|----------------|----------------------|----|
| Anexo 1.2      | Río Negro.....       | 72 |
| Anexo 1.4      | Grupo Cogollo.....   | 75 |
| Anexo 1.5      | La Luna.....         | 77 |
| Anexo 1.7      | Colón/Mito Juan..... | 79 |
| Anexo 1.9      |                      |    |
| Paleoceno..... |                      | 81 |
| Anexo 1.11     | Misoa.....           | 83 |
| Anexo 1.13     | Oligoceno.....       | 85 |
| Anexo 1.15     | La                   |    |
| Rosa.....      |                      | 87 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| Anexo 1.17                    |    |
| Lagunillas.....               | 89 |
| Anexo 1.19 La Puerta.....     | 91 |
| Anexo 1.21 Onia-Reciente..... | 94 |

## **Diagramas de soterramiento**

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Anexo 2.1 Diagrama de soterramiento Pozo A1.....  | 95  |
| Anexo 2.2 Diagrama de soterramiento Pozo A3.....  | 95  |
| Anexo 2.3 Diagrama de soterramiento Pozo A4.....  | 96  |
| Anexo 2.4 Diagrama de soterramiento Pozo B1.....  | 96  |
| Anexo 2.5 Diagrama de soterramiento Pozo B2.....  | 97  |
| Anexo 2.6 Diagrama de soterramiento Pozo B3.....  | 97  |
| Anexo 2.7 Diagrama de soterramiento Pozo B4.....  | 98  |
| Anexo 2.8 Diagrama de soterramiento Pozo B5.....  | 98  |
| Anexo 2.9 Diagrama de soterramiento Pozo B6.....  | 99  |
| Anexo 2.10 Diagrama de soterramiento Pozo B7..... | 99  |
| Anexo 2.11 Diagrama de soterramiento Pozo C1..... | 100 |
| Anexo 2.12 Diagrama de soterramiento Pozo C3..... | 100 |
| Anexo 2.13 Diagrama de soterramiento Pozo C4..... | 101 |
| Anexo 2.14 Diagrama de soterramiento Pozo D2..... | 101 |
| Anexo 2.15 Diagrama de soterramiento Pozo E2..... | 102 |
| Anexo 2.16 Diagrama de soterramiento Pozo E3..... | 102 |
| Anexo 2.17 Diagrama de soterramiento Pozo E4..... | 103 |
| Anexo 2.18 Diagrama de soterramiento Pozo E5..... | 103 |

## **Calibraciones**

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| Anexo 3.1 Calibración. Pozo A1..... | 104 |
| Anexo 3.2 Calibración. Pozo A2..... | 104 |
| Anexo 3.3 Calibración. Pozo A4..... | 105 |
| Anexo 3.4 Calibración. Pozo B1..... | 105 |
| Anexo 3.5 Calibración. Pozo B4..... | 106 |
| Anexo 3.6 Calibración. Pozo B5..... | 106 |

|            |                           |     |
|------------|---------------------------|-----|
| Anexo 3.7  | Calibración. Pozo B6..... | 107 |
| Anexo 3.8  | Calibración. Pozo B7..... | 107 |
| Anexo 3.9  | Calibración. Pozo C1..... | 108 |
| Anexo 3.10 | Calibración. Pozo D3..... | 108 |
| Anexo 3.11 | Calibración. Pozo E1..... | 109 |
| Anexo 3.12 | Calibración. Pozo E2..... | 109 |
| Anexo 3.13 | Calibración. Pozo E4..... | 110 |

## **Estratigrafía**

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 4.1: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| A1.....                                                   | 111 |
| Anexo 4.2: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| A2.....                                                   | 112 |
| Anexo 4.3: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| A4.....                                                   | 113 |
| Anexo 4.4: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B1.....                                                   | 114 |
| Anexo 4.5: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B2.....                                                   | 115 |
| Anexo 4.6: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B3.....                                                   | 116 |
| Anexo 4.7: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B4.....                                                   | 117 |
| Anexo 4.8: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B5.....                                                   | 118 |
| Anexo 4.9: Estratigrafía correspondiente al pozo          |     |
| B6.....                                                   | 119 |
| Anexo 4.10: Estratigrafía correspondiente al pozo         |     |
| B7.....                                                   | 120 |
| Anexo 4.11: Estratigrafía correspondiente al pozo C1..... | 121 |
| Anexo 4.12: Estratigrafía correspondiente al pozo C3..... | 122 |
| Anexo 4.13: Estratigrafía correspondiente al pozo C4..... | 123 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 4.14: Estratigrafía correspondiente al pozo D2.....           | 124 |
| Anexo 4.15: Estratigrafía correspondiente al pozo D3.....           | 125 |
| Anexo 4.16: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>E1.....        | 126 |
| Anexo 4.17: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>E3.....        | 127 |
| Anexo 4.18: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>E4.....        | 128 |
| Anexo 4.19: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>E5.....        | 129 |
| Anexo 4.20: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>BESE.....      | 130 |
| Anexo 4.21: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>FDFN89C45..... | 131 |
| Anexo 4.22: Estratigrafía correspondiente al pozo Foredeep.....     | 132 |
| Anexo 4.23: Estratigrafía correspondiente al pozo D1.....           | 133 |
| Anexo 4.24: Estratigrafía correspondiente al pozo<br>FDRT.....      | 134 |
| Anexo 4.25: Estratigrafía correspondiente al pozo E71.....          | 135 |

## **Medidas de madurez**

|           |                                     |     |
|-----------|-------------------------------------|-----|
| Anexo 5.1 | Medidas de madurez del pozo A1..... | 136 |
| Anexo 5.2 | Medidas de madurez del pozo A2..... | 136 |
| Anexo 5.3 | Medidas de madurez del pozo A4..... | 136 |
| Anexo 5.4 | Medidas de madurez del pozo B1..... | 137 |
| Anexo 5.5 | Medidas de madurez del pozo B4..... | 137 |
| Anexo 5.6 | Medidas de madurez del pozo B5..... | 137 |

|            |                                     |     |
|------------|-------------------------------------|-----|
| Anexo 5.7  | Medidas de madurez del pozo B6..... | 138 |
| Anexo 5.8  | Medidas de madurez del pozo B7..... | 138 |
| Anexo 5.9  | Medidas de madurez del pozo D3..... | 138 |
| Anexo 5.10 | Medidas de madurez del pozo C1..... | 138 |
| Anexo 5.11 | Medidas de madurez del pozo E1..... | 139 |
| Anexo 5.12 | Medidas de madurez del pozo E4..... | 139 |

## **Introducción**

En los pasados diez a quince años, la naturaleza de la exploración del petróleo ha experimentado cambios significativos. La meta en exploración es la de optimizar prospectos de evaluación y presupuestos de exploración (Platte River Associates, 1995).

Gracias a la integración de la información proveniente de las diferentes disciplinas como la geología, la geoquímica y la geofísica, el modelado de cuencas petrolíferas proporciona información acerca del sistema petrolero de una cuenca, así como la prospectividad y el potencial generador de hidrocarburos de acuerdo a las características de una roca madre presente en un área determinada.

El modelaje de madurez permite realizar simulaciones y a su vez pronosticar la generación de los hidrocarburos en las partes más profundas de la cuenca (no perforada) donde otros métodos no pueden, basándose idealmente en una calibración, la cual permite minimizar las diferencias entre los valores medidos (datos reales) y los valores obtenidos del modelo, manteniendo así la conexión con los diferentes eventos geológicos ocurridos.

Algunos estudios han sido realizados aplicando el modelado de cuencas en Venezuela, en una (1) y dos (2) dimensiones, haciendo uso de una variedad de programas tales como BasinMod (Guaquirian, 2000), Genex (Hernández, 2001) y Petromod para la realización del modelado de la generación y acumulación de hidrocarburos. También en cuencas sedimentarias ubicadas en Costa Rica y Argentina (Lutz *et al* 2004 y Rodríguez *et al* 2001. respectivamente), y en Venezuela, el modelado computarizado para determinar la generación y migración de petróleo en 2D, aplicado a un transecto ubicado en la cuenca al este de Venezuela (Gallango *et al*, 1995) y Geoquímica y Modelado de generación de hidrocarburos en Sinclinal de Dibujo al Norte de la

Sierra de Perijá (Cassani *et al*, 1997). Cada uno de estos estudios ha logrado predecir la velocidad de transformación del kerógeno en hidrocarburos, el tiempo en que éstos son expulsados. así como las unidades de reservorios a las que éstos migran, entre otros procesos. Todos estos

estudios integran la información geoquímica, la evolución tectónica, los datos litoestratigráficos, datos térmicos, datos petrofísicos, entre otros datos, correspondientes a una zona en particular, haciendo la mejor estimación de la historia termal, de erosión y de soterramiento del área de estudio.

En la Cuenca de Maracaibo, ubicada en Venezuela, se han realizado estudios importantes que aportan una valiosa información para realizar el modelado de la cuenca. El área de estudio objetivo de este trabajo, está en la Cuenca de Maracaibo, más específicamente la región del sur. En el sur de la Cuenca de Maracaibo sólo ha sido realizado un modelado geoquímico en una dimensión (1D) que ha permitido establecer el flujo de calor, evolución termal, evaluación de la roca madre, madurez y edades de generación y expulsión de hidrocarburos verticalmente (Llanos, 2000). Por esta razón, es importante realizar un modelado geoquímico en dos dimensiones (2D), objetivo fundamental del presente trabajo, que permita la evaluación más detallada, el establecimiento y delineación de los posibles conductos de migración, regimenes de presión bajo los cuales están siendo sometidos los hidrocarburos y establecer tiempo de generación, para así poder reducir el riesgo de exploración debido una mejor integración de la información y de datos geológicos, físicos y geoquímicos. El cumplimiento de este alcance permitirá lograr los siguientes objetivos específicos:

- Adquirir conocimientos, técnicas y manejo del programa que permite la realización del modelado geoquímico.
- Modelar la transferencia de calor, madurez, presión/sobrepresión tomando en consideración las interacciones entre todos los procesos físicos, tales como compactación, erosión, sedimentación y temperatura.
- Interpretar los resultados obtenidos del modelado geoquímico en dos dimensiones (2D).

## **Área de estudio**

La Cuenca de Maracaibo ocupa un área de alrededor de 50.000Km<sup>2</sup> y está delimitada al noroeste por la Cordillera de Perijá, al suroeste por el Macizo de Santander de Colombia y al sureste por los Andes Venezolanos. El límite al noreste está formado por la zona occidental piemontina de la Cordillera de Trujillo, la cual la separa de la Cuenca de Falcón. Hacia el norte está ubicado el Golfo de Venezuela (Talukdar y Marcano, 1994)

El área de estudio está ubicada en la región sur de la Cuenca del Lago de Maracaibo (Ver fig.1), abarcando un área aproximada de 6160 Km<sup>2</sup>.

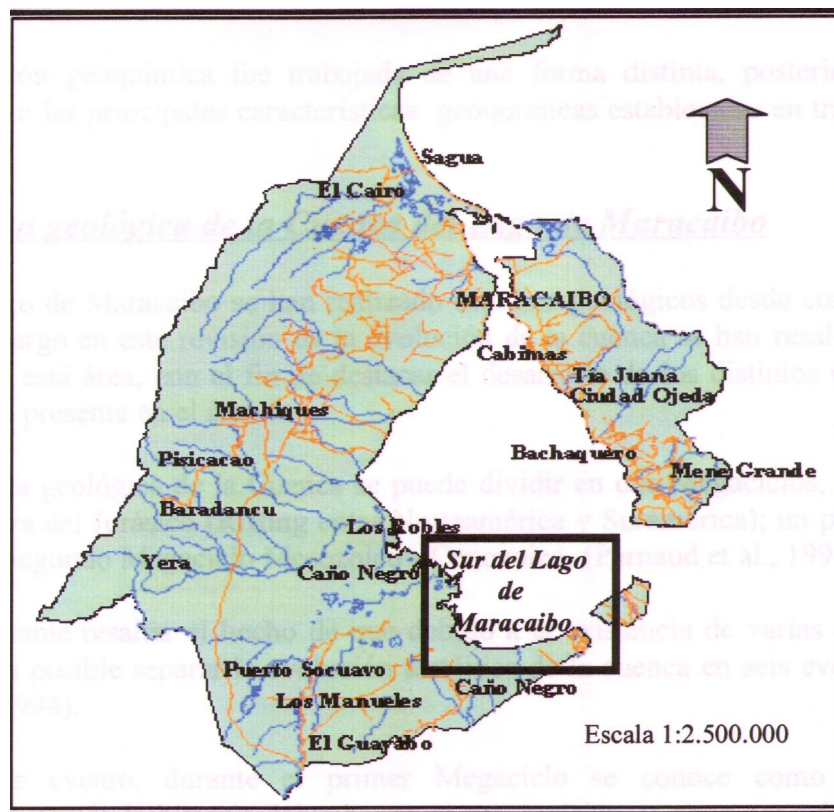


Fig.1 Área de Estudio. (Llanos, 2000)

## **Estudios Previos**

En la Cuenca de Maracaibo han sido realizados estudios de modelado geológico/geoquímico con el fin de interpretar la respuesta sedimentaria a los diferentes eventos tectónicos desarrollados en ésta parte de la cuenca y tomando como principal roca madre la Formación La Luna. Entre estos estudios podemos destacar los siguientes:

“Geoquímica y Modelado de generación de hidrocarburos en Sinclinal de Dibujo al Norte de la Sierra de Perijá, Cuenca de Maracaibo. (Elaborado por Cassani y Quijada, 1997).

“Modelado Geoquímico en el Sur del Lago”. Realizado por Llanos, Y (2000), para la elaboración de su trabajo especial de grado.

Este último trabajo realizado en el sur de la Cuenca de Maracaibo es de gran importancia ya que los datos integrados en el son utilizados en el presente estudio y las conclusiones que de el se derivan son un punto de partida para estudios futuros.

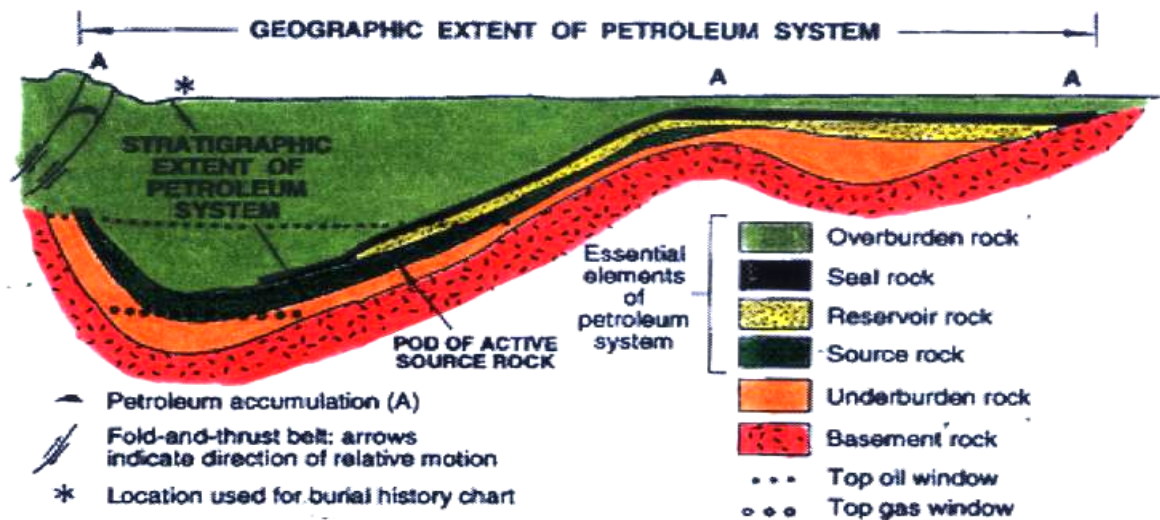
## **MARCO TEORICO**

### **Sistema Petrolero**

Un Sistema Petrolero es definido como un sistema natural que comprende una o más rocas madres activas (o que fueron activas en el tiempo geológico), e incluye todos los elementos geológicos y los procesos que son esenciales para que la acumulación de hidrocarburos exista. El término Petróleo incluye las altas concentraciones de (1) gas térmico o biogénico en yacimientos convencionales, o gas hidratado en yacimientos como lutitas fracturadas y rocas ígneas; y (2) condensados, crudos y asfalto. Por otro lado el término Sistema describe la interdependencia de los elementos y procesos que forman la unidad funcional que conlleva a la acumulación de hidrocarburos (Magoon y Dow, 1994).

Los elementos esenciales que conforman el Sistema Petrolero son, una roca madre, una roca reservorio, una roca sello y la sobrecarga de roca; mientras que los procesos que lo incluyen son la formación de trampas, la generación-expulsión-acumulación de petróleo, la sincronización de estos eventos y la preservación del petróleo (Fig. 2). Estos elementos y procesos esenciales deben estar sincronizados en el tiempo y en el espacio, para que la materia orgánica incluida en la roca madre pueda ser convertida en acumulaciones de petróleo. Un sistema petrolero existe donde los elementos esenciales y los procesos ocurren (Magoon y Dow, 1994).

De acuerdo a Demaison y Huizinga (1994) un sistema petrolífero esta conformado por dos subsistemas:



**Figura 2:** Extensión geográfica de un Sistema Petrolero.

(Modificado de Magoon y Dow, 1994)

1. Un subsistema generativo que provee el petróleo. Este subsistema esta controlado por procesos químicos, que consisten en la degradación bioquímica de la materia orgánica en descomposición a querógeno (diagénesis) y la transformación por temperatura para la generación de crudo y gas (catagénesis).

2. Un subsistema de migración y entrapamiento que determina la o las direcciones de migración y llenado de los yacimientos, para producir acumulaciones de importancia económica.

## **Roca madre**

Una roca madre es una roca sedimentaria que contiene materia orgánica suficiente y una composición química adecuada para biogénicamente o termogénicamente generar y expulsar petróleo (Magoon y Dow, 1994).

Una típica roca madre es de color oscuro, rica en materia orgánica y generalmente es representada por una lutita finamente laminada. Los carbones, calizas y otras rocas silicatadas también pueden ser rocas madres.

Los organismos vivos que contribuyen a la formación de acumulaciones de materia orgánica son: bacterias, fitoplancton, zooplancton y plantas superiores. Estos organismos vivos están constituidos por compuestos químicos, como: lípidos, proteínas, carbohidratos y lignina. Una vez que esta biomasa es preservada, sufre una serie de cambios por efecto de procesos biológicos y químicos (Magoon y Dow, 1994).

## **Alteración de la materia orgánica**

Los procesos asociados durante la alteración de la materia orgánica son: la diagénesis, catagénesis, la metagénesis y madurez termal.

La diagénesis se refiere a todos los cambios químicos, biológicos y físicos que experimenta la materia orgánica durante y después de la deposición de los sedimentos y bajo condiciones de temperaturas entre 60 a 80 °C. (Hunt, 1995).

La catagénesis ocurre cuando los sedimentos alcanzan profundidades donde las condiciones de temperatura producen el craqueo térmico del querógeno, llevando a la generación de petróleo. El intervalo de temperatura

para esta etapa, está entre 50 a 150°C o entre 50 a 200°C (Hunt, 1995). La cantidad y tipo de petróleo generado por una roca fuente se relaciona al tipo de querógeno presente en esta, y el tipo de querógeno formado va a depender del tipo de materia orgánica depositada originalmente en el ambiente de sedimentación. En términos de la exploración de petróleo, la catagénesis corresponde a la zona principal de generación de petróleo

La catagenésis corresponde a la etapa en la cual el querógeno en la roca fuente genera el bitúmen, el cual es expulsado de esta roca y migra, esta migración puede ser primaria y/o secundaria, hasta un lugar donde es entrampado y forma un yacimiento de petróleo (Magoon y Dow, 1994).

Por su parte, la metagénesis corresponde a la última etapa de alteración de la materia orgánica. Este proceso ocurre en un intervalo de temperatura entre los 200 a 250°C. Durante esta etapa solo ocurre la generación de gas, principalmente CH<sub>4</sub>.

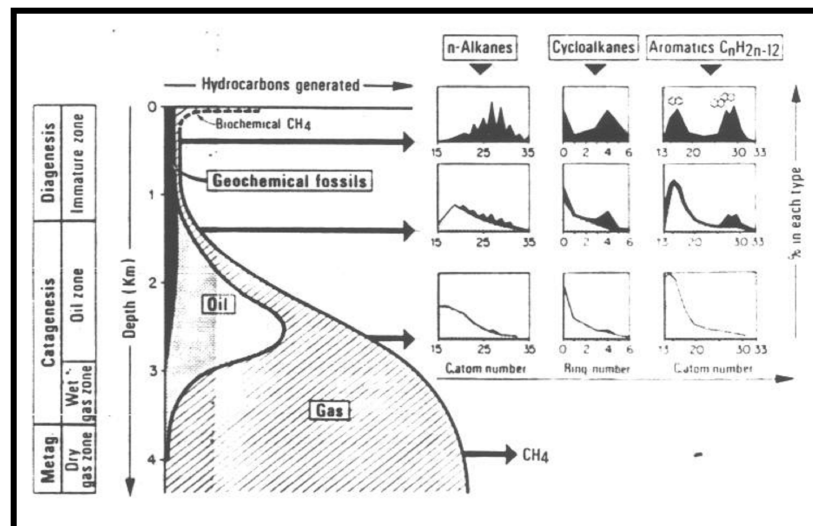
La materia orgánica residual en la roca fuente es transformada en material grafitoso (Magoon y Dow, 1994).

La vitrinita consiste en un maceral orgánico de densidad intermedia que está presente dentro de la depositación de los sedimentos. La reflectancia de la vitrinita (Ro%) es utilizada como indicador de madurez termal, ya que existe una relación lineal entre la medida de la luz reflectada y la madurez. Este maceral es considerado un termómetro de máxima temperatura, debido a que la alteración química que ocasiona la variación de la reflectancia es irreversible.

Una roca madre termalmente inmadura estuvo en la etapa de diagénesis sin producir efectos de temperatura (< 0,6 %Ro) y donde el gas producido es generado por la actividad de microorganismos. La materia

orgánica termalmente madura está (o estuvo) en la ventana de petróleo ( $\approx 0,6-1,35$  %Ro), y fue afectada por los procesos termales en un rango de temperatura entre 60 a 150°C. La materia orgánica termalmente sobremadura, se encuentra en la ventana de generación de gas ( $> 1,35$  %Ro), al haber experimentado altas temperaturas, entre 150 a 200 °C, Ver figura 3 (Magoon y Dow, 1994).

La técnica de pirólisis consiste en la simulación en el laboratorio del proceso natural de madurez de la materia orgánica, y aporta datos geoquímicos relevantes para la determinación del tipo de materia orgánica y también su madurez. En el área de estudio no se tienen datos de pirolisis disponibles, por lo que no explicaremos esta técnica (Hernández, 2001).



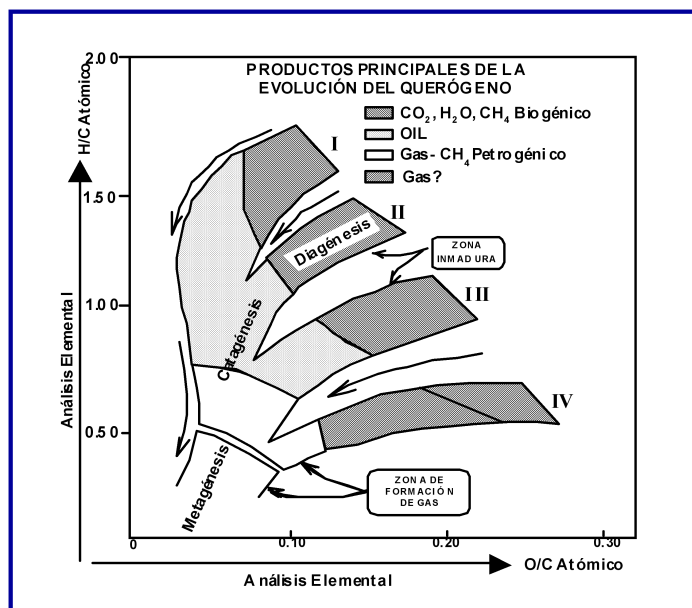
**Figura 3:** Esquema general de la formación de hidrocarburos en función de la profundidad de soterramiento de la roca fuente. Etapas de diagénesis, catagénesis y metagénesis (modificado de Tissot y Welte, 1984).

### Clasificación de la materia orgánica

El Querógeno es un material orgánico polimerizado del cual los hidrocarburos son producidos con el incremento de la presión y temperatura, es insoluble en solventes orgánicos. Está diseminado en forma de macerales (remanentes de varios tipos de plantas y animales) producto de la degradación

de la materia orgánica. Mientras que, el bitumen es la fracción de la materia orgánica que es soluble en solventes orgánicos. (Killops et al, 1993).

Un ambiente de depositación va a estar caracterizado por un tipo de materia orgánica en particular, y a medida que aumenta la madurez con el incremento de la temperatura y presión, da como resultado diferentes tipos de querógenos, debido a la pérdida de los diferentes grupos funcionales que lo componen y sufren alteración, estos pueden ser diferenciados entre sí comparando las relaciones atómicas H/C y O/C, gráficamente puede



observarse en el diagrama de Van Krevelen (Fig. 4)

Han sido caracterizados varios tipos de querógeno (I, II, III y IV). En la cuenca de Maracaibo, la roca madre principal (La Luna) tiene Querógeno del tipo II, generalmente formado por restos de algas, característicos de ambientes marinos, reductores, considerado como potencial para la generación de petróleo y gas (Ver tabla #1) y presenta altas relaciones de H/C y bajas relaciones de O/C (Mello, 1996)

**Tabla #1:** Tipos de Querógeno, según su origen y potencial de hidrocarburos  
(Modificado de Platte River Associates, 2001)

| Ambiente de Deposición                                            | Tipo de Kerógeno | Origen                                                                | Potencial de Hidrocarburos            |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Lacustrino                                                        | I                | Algal                                                                 | Petróleo                              |
| Acuático marino típico                                            | I ó II           | Material amorfo de origen algal                                       | Petróleo                              |
|                                                                   | II / II-S        | Material planctónico sin estructura, principalmente de origen algal   | Petróleo/Condensado                   |
| Restos de esporas y polen, cutículas de hojas y plantas herbáceas |                  |                                                                       |                                       |
| Terrestre                                                         | III              | Plantas fibrosas y leñosas y material coloidal humico no estructurado | Gas y algo de petróleo<br>sí HI > 150 |
|                                                                   |                  | IV                                                                    | Materia orgánica reabajada            |
|                                                                   | Carbonoso        |                                                                       | Carbono muerto sin potencial          |

**Cantidad de materia orgánica**

La cantidad de materia orgánica, es uno de los principales criterios a considerar en las rocas madres. Es una medida de la cantidad de materia orgánica que está incorporada al sedimento y preservada en las rocas sedimentarias.

## **Roca reservorio o roca yacimiento**

Una roca reservorio es una roca con porosidad y permeabilidad suficiente como para permitir la migración y acumulación de los fluidos (crudo, gas y agua) (Magoon y Dow, 1994).

Hay dos propiedades que describen un reservorio: su porosidad y su permeabilidad. *La porosidad* es el porcentaje de espacios vacíos (poros) respecto al volumen total de la roca, y es una medida de la capacidad de almacenamiento del reservorio. Es denotada por la letra  $\phi$  (*phi*).

La permeabilidad describe la facilidad con que un líquido dado puede moverse a través del reservorio; sin producir cambios en la estructura del medio de desplazamiento. La constante *K* de permeabilidad esta definida por la ecuación que expresa la Ley de Darcy.

La reducción de la porosidad por compactación es modelada en este estudio y es determinante para la estimación de propiedades térmicas de las rocas como es la conductividad y la capacidad calórica. Por otro lado, la permeabilidad es una característica de las rocas de gran importancia para el modelado del movimiento de los fluidos a través del tiempo.

## **Roca sello**

Son rocas de baja porosidad y permeabilidad, de tal forma que no permiten el paso de los hidrocarburos a través de ellas. Las acumulaciones de hidrocarburos y las rutas de migración están limitadas por la presencia de

superficies impermeables. Por lo tanto, la distribución regional de las rocas que actúan como sellos determina la extensión del sistema petrolífero en la cuenca (López, 2006).

Existen dos tipos de sellos. Los *sellos regionales* que dirigen y controlan la distribución de los hidrocarburos en la cuenca y los *sellos locales* que detienen la migración y retienen las acumulaciones de hidrocarburos en las trampas. La capacidad sellante de las rocas esta determinada principalmente por su litología, donde las evaporitas, lutitas y las mismas rocas madres son las mejores rocas sellos, por sus características de uniformidad litológica, son dúctiles y pueden mantener grandes presiones de fluidos (petróleo y agua) sin deformarse ni fracturarse.

## **Sobrecarga de roca**

Está referido al grupo de rocas suprayacente a la roca sello y la roca generadora, que comprimen y consolidan todo el material que es encontrado por debajo de ellas (Magoon y Dow, 1994).

Este conjunto de rocas contribuye al soterramiento de la roca madre por la presión litostática, permitiendo que sean alcanzadas condiciones de temperatura para la generación de hidrocarburos. Contribuye con la pérdida de porosidad de la roca reservorio debido a la compactación, con la transformación de la roca sello en una mejor barrera contra la migración de hidrocarburos, y con la acumulación de crudo y gas en trampas con temperaturas óptimas que previenen la biodegradación.

## **Procesos del Sistema Petrolero**

De acuerdo a Demaison y Huizinga (1994), un sistema petrolífero es descrito de acuerdo a tres factores geológicos: Carga, Migración y Entrampamiento. Estos tres factores deben ocurrir de forma secuencial y son

por lo tanto condicionales. Por ejemplo, para entender lo anterior, la migración no puede ocurrir sin que exista una carga, relacionada a la generación de petróleo.

- La migración-entrapamiento, está relacionada a la expulsión y migración del petróleo hasta una zona donde el petróleo generado pueda ser acumulado porque existe una trampa. La migración-entrapamiento está controlada por procesos físicos y químicos que incluyen los mecanismos de migración primaria, migración secundaria (flotación) y los factores que definen la formación de una trampa (roca reservorio, trampa, sello).

## **Formación de la trampa**

Una trampa puede ser definida como cualquier arreglo geométrico de rocas, que permiten la acumulación en cantidades significativas de crudo, gas o ambas en el subsuelo. A pesar de ser un arreglo geométrico que retiene hidrocarburos, las trampas deben tomar en cuenta una serie de componentes críticos para poder ser más efectivas. Por lo tanto, éstas deben incluir tanto las rocas reservorio como las rocas sello, las cuales tienen una configuración tridimensional para detener o acumular los hidrocarburos en el subsuelo (Magoon y Dow, 1994).

El modelado realizado en este estudio esta hecho con interpretaciones donde las trampas no están específicamente definidas.

## **Modelado de la generación-expulsión-migración-acumulación de hidrocarburos**

Para el estudio de generación de hidrocarburos es necesario disponer de una gran información geoquímica, geológica y geofísica, que permita establecer, tanto la calidad de la roca generadora de hidrocarburos como su ubicación en la columna estratigráfica. Además de esto, es necesario conocer

la cinética de las reacciones que intervienen en las transformaciones del querógeno en hidrocarburos y establecer las edades de generación y expulsión dentro del modelo geoquímico.

El proceso de expulsión está asociado a la cantidad o al volumen de hidrocarburos expulsados por la roca madre, lo cual le confiere una gran importancia desde el punto de vista de exploración gracias a la utilización de métodos que permiten reproducir las condiciones de presión y temperatura a las cuales fue sometida la roca en el momento de la expulsión, límites de saturación de la roca y la densidad del petróleo. Es posible obtener la simulación del proceso de expulsión dentro del modelo geoquímico, y además determinar las edades y los volúmenes asociados a este proceso.

Actualmente los mecanismos mayormente aceptados de migración primaria involucran aumentos de volumen y presión de hidrocarburos en los microporos de la roca madre, debido a las transformaciones del kerógeno por efectos térmicos. Por otra parte, la migración secundaria está relacionada a los efectos de flotabilidad de los hidrocarburos (Rocha, 2000).

## **Tiempo de preservación**

El tiempo asociado a la preservación ocurre una vez que los procesos de generación, migración y acumulación de crudo y gas han ocurrido. Los procesos que ocurren durante el tiempo de preservación son: remigración, degradación biológica o física y/o destrucción completa de los hidrocarburos.

**Durante el tiempo de preservación, la remigración de petróleo puede facilitar la acumulación en trampas formadas después que la generación de hidrocarburos ha cesado en el sistema petrolero.**

## **Eventos del sistema petrolero**

El diagrama de eventos del sistema petrolero (Figura 5), para la Cuenca de Maracaibo. Permite observar la relación temporal entre los elementos esenciales del sistema petrolero, sus procesos, el tiempo de preservación y el momento crítico de dicho sistema.

Este diagrama presenta ocho eventos distintos referidos a una escala de tiempo geológico. La roca madre, roca reservorio, roca sello y la sobrecarga (soterramiento) de roca son elementos esenciales estudiados estratigráficamente que representan los primeros cuatro eventos. La función de cada una resulta vital para el sistema petrolero. La menos evidente de todas es la función de la sobrecarga de roca, la cual está íntimamente relacionada con los procesos de generación y migración, ya que esta sobrecarga provee la profundidad necesaria para lograr la madurez termal que permita que dichos procesos sucedan.

**Figura 5:** Diagrama general de eventos del sistema petroleros para la Cuenca de Maracaibo (Schlumberger, 1997).

El siguiente evento abarca el fin de la generación, migración y acumulación dentro del sistema petrolero hasta la actualidad y es denominado tiempo de preservación, en el cual los hidrocarburos pueden ser preservados, transformados o destruidos. Si ocurriese el caso en que la generación, migración y acumulación estuviesen prolongados hasta la actualidad, es esperado que la mayor parte de los hidrocarburos hayan sido preservados y una muy pequeña parte podría haber sido transformados o destruidos.

El último evento, está relacionado con el momento crítico, el cual es un punto escogido por el investigador como la mejor representación de la generación, migración y acumulación de la mayor cantidad de hidrocarburos de un sistema petrolero.

## **Importancia en la Evaluación de Riesgos del Sistema Petrolero**

El término riesgo en el argot de exploración petrolera tiene una gran cantidad de definiciones, pero su principal objetivo es determinar, cuantificar y especificar todos aquellos factores que puedan afectar las posibilidades de descubrir una acumulación de hidrocarburos en cantidades comerciales (Magoon, 1995).

Una de las metas principales de la exploración petrolera es caracterizar el sistema petrolero para así poder localizar y/o descubrir las acumulaciones de hidrocarburos. La habilidad para caracterizar y cartografiar el sistema petrolero de manera correcta, conlleva a que el riesgo exploratorio disminuya, y que la probabilidad de éxito aumente.

En la evaluación de riesgos del sistema petrolero es tomado en cuenta principalmente tres variables. Las cuales son:

- La presencia de una trampa
- La presencia de la carga de petróleo
- Sincronización entre la trampa y la carga de petróleo.

## **Modelado aplicado al estudio de cuencas sedimentarias**

### **Modelos predictivos**

El modelo predictivo puede definirse como la formulación estadística de procesos, en los cuales funciones matemáticas tratan de simular de forma satisfactoria el manejo de ciertas variables fundamentales, que intervienen en tales procesos. El desarrollo de los modelos predictivos, integrando las condiciones geológicas y los procesos geoquímicos, han sido probados con éxito en la reducción del riesgo de exploración. Los modelos predictivos son clasificados como determinísticos, los cuales plantean la determinación del potencial de hidrocarburo en las cuencas a partir de simulaciones matemáticas de los principios físicos, químicos y biológicos, y probabilísticos los cuales están basados en la probabilidad de encontrar hidrocarburos, utilizan parámetros los más reales posibles para obtener cual es la respuesta de mayor probabilidad de ocurrencia. (Platte Rivers Associates, 1995).

El modelado aplicado al estudio de cuencas sedimentarias describe el modelo numérico de cualquier proceso físico o químico, el cual toma lugar en una cuenca, incluyendo la evolución tectónica, depositación, erosión de los sedimentos, generación de hidrocarburos y expulsión en dicha cuenca (Platte Rivers Associates, 1995). Para la realización del modelado de cuencas es necesario conocer la historia termal, historia de soterramiento así como también la evolución de la materia orgánica. Generalmente el simulacro de la generación de hidrocarburos está basado idealmente en la calibración establecida en un pozo o con datos de geología de superficie.

## Historia de soterramiento

La historia de soterramiento es determinada haciendo uso de los diagramas de soterramiento de tiempo/profundidad los cuales para su realización requiere de la siguiente información: profundidad de los topes de cada formación, o espesores de formación en el tiempo presente, así como también la edad de los topes de las formaciones en millones de años. Los diagramas de soterramiento permiten realizar interpretaciones acerca de la tasa de sedimentación, tiempo y cantidad de levantamiento y subsidencia. Con la adición de datos litológicos, las correcciones de compactación y flujo de calor pueden ser calculadas y las litologías ser ilustradas sobre el diagrama (Platte Rivers Associates, 1995).

La subsidencia total en una cuenca es una combinación de la subsidencia debida a la tectónica y la subsidencia debido a la carga del sedimento. El proceso utilizado para determinar la cantidad de subsidencia por carga inducida es por descompactación isostática, a través de una técnica denominada "Backstripping" la cual utiliza la ecuación 1.

### Ecuación 1:

$$Y = S \left( \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} \right) - \Delta SL \left( \frac{\rho_w}{\rho_m - \rho_w} \right) + (W_d - \Delta SL)$$

Y= Profundidad del basamento, corregida por la carga sedimentaria

S = Espesor total de la columna sedimentaria, corregida por compactación

$\rho_m$ = Densidad promedio del manto

$\rho_s$  = Densidad promedio de los sedimentos

$\rho_w$ = Densidad promedio del agua

$\Delta SL$ = Cambios en el promedio del nivel del mar

$W_d$  = Paleopropundidad del mar (Platte Rivers Associates, 1995)

Una vez que es conocido el componente inducido de carga de subsidencia total, se conoce a su vez la cantidad de subsidencia tectónica. Los resultados de estos cálculos se ilustran en una curva de subsidencia descompactada (“Graphs/Burial/History/Subsidence”).

## **Modelado termal considerando el flujo de calor**

El flujo de calor de una cuenca sedimentaria determina las temperaturas a las que han sido sometidos los sedimentos durante el transcurso del soterramiento.

El modelado termal está condicionado por las propiedades térmicas de las rocas. La conductividad térmica que presenta una roca es una función de la conducción por la matriz, y la conducción y transporte convectivo del calor por el agua de la formación en los poros. Diferentes rocas poseen distintas conductividades termales, que cambian con la temperatura, compactación y litificación a medida que la relación del agua en los poros aumenta.

Para la realización del modelado termal el programa presenta dos opciones para el cálculo de las geotemperaturas usando el flujo de calor (Platte Rivers Associates, 1995):

- **Flujo de calor de estado estacionario:** en donde cada intervalo del tiempo del modelo es calculado independientemente de los otros intervalos de tiempo usando la ecuación 2:

### **Ecuación 2:**

**Flujo de calor** = conductividad térmica X gradiente de temperatura

- **Flujo de calor de estado transitorio:** utiliza una ecuación diferencial que lleva en cuenta la capacidad calorífica de las diferentes unidades de roca. Cambios repentinos en el flujo de calor o en la profundidad no ocasionaran cambios repentinos en el perfil termal, o la capacidad de

calor de la roca. El cálculo es realizado utilizando la siguiente ecuación 3:

**Ecuación 3:**

$$\frac{d}{dx} (K \frac{dT}{dx}) + Q = C \frac{dT}{dt}$$

Donde: x = profundidad

t = tiempo

Q = velocidad de generación interna del calor (j/sm<sup>3</sup>)

C = capacidad calorífica (j/m<sup>3</sup> K)

K = conductividad termal (j/smK)

T = temperatura (°K)

(Platte Rivers Associates, 1995)

**Flujos de calor tipo “Rifting”**

El “Rifting” causa perturbaciones significativas en la historia termal. Este tipo de modelado está basado en una simplificación obtenida de MacKenzie (modelo finito de “rifting”, 1988) el cual es la teoría más aceptada, así como menos complicado de aplicar, pudiendo involucrar así dos fases (Platte Rivers Associates, 1995):

:

- La fase de “rifting”: extensión, tiempo y calentamiento de la corteza acompañado por incrementos en el flujo de calor debido al adelgazamiento de la corteza e “insurgencia” de la astenósfera.
- La fase de la Subsistencia: “post-rift” decaimiento exponencial termal debido al reestablecimiento del equilibrio termal en la litósfera y astenosfera.

**Modelado de la generación y expulsión de hidrocarburos**

El modelado de la generación y expulsión de hidrocarburos puede ser utilizado para calcular la cantidad de petróleo y gas generado a través del tiempo geológico para cualquier horizonte de roca madre. Haciendo uso de la cinética a través de la ecuación de Arrhenius (ecuación 5), la cual requiere que la molécula del precursor, en este caso considerado como el kerógeno, absorba cierta cantidad de energía (vibración enlace-calor), para que así ocurra la ruptura de los enlaces químicos favoreciendo la producción del petróleo, esto permite calcular el craqueo del kerógeno a petróleo, kerógeno a gas y de petróleo a gas (Platte Rivers Associates, 1995):

**Ecuación 4:**  $K = A e^{-E_a/RT}$

Donde: K = la velocidad de la reacción (unidades:  $\text{ma}^{-1}$ )

A = el factor de frecuencia (unidades:  $\text{ma}^{-1}$ ,  $\text{seg}^{-1}$ )

$E_a$  = la energía de activación (unidades: Kcal/mol)

R = constante universal de los gases (unidades: 8.31432 joules/ $^{\circ}\text{K}$ )

T = la temperatura (unidad:  $^{\circ}\text{K}$ )

## **Eficiencia de expulsión**

Está basado en que los hidrocarburos generados serán expulsados a un nivel dado de madurez termal ( $R_o\%$ ) o de relación de transformación. Partiendo que ciertos querógenos tienen la capacidad de generar a niveles de madurez más tempranos debido a lo bajos valores de energía de activación, de éstos se puede esperar una expulsión más temprana. Rocas madres enriquecidas en materia orgánica tendrán la capacidad de acumular mayores volúmenes de hidrocarburos en comparación a rocas madres menos enriquecidas, y por lo tanto se espera que comiencen el proceso de expulsión en una etapa más temprana. Otro factor de gran importancia a tomar en consideración es la geometría sedimentaria de las rocas madres. La eficiencia de expulsión es

más alta cuando las rocas madres son más delgadas y los hidrocarburos poseen una distancia corta (metros, decenas de metros) para migrar a rocas que permitan una mayor fluidez, rocas más porosas (Platte Rivers Associates, 1995).

La eficiencia de expulsión correlacionada con la saturación de hidrocarburos en los poros considera la capacidad de llenar el espacio poroso intergranular por los hidrocarburos. Es asumido que los hidrocarburos reemplazan al agua en los poros durante la generación. Una vez que cierto porcentaje de espacio poroso ha sido llenado, debido al proceso de geocromatografía natural, todos los hidrocarburos adicionales son expulsados (Platte Rivers Associates, 1995)

## Modelado de migración de hidrocarburos

Todos los cálculos asociados al modelado de migración de hidrocarburos son realizados en unidades estándar. El procedimiento está basado en tres ecuaciones requeridas para la evaluación geoquímica de un prospecto (Platte Rivers Associates, 2006).

$$\text{ME} = \sum (P_0) (PGI) (PEE_n) (\rho_{\text{rock}}) (Y) (\text{AREA}) \quad (1)$$

Esta ecuación permite calcular los fluidos de la masa de petróleo expulsados desde las porciones de la roca fuente aproximadamente de igual madurez, éstas son llamadas “porciones de isomadurez”. Las porciones contenidas en la roca fuente significan grosor (**Y**) y la densidad de volumen en el subsuelo ( **$\rho_{\text{rock}}$** ). El AREA corresponde al área correspondiente a la porción de isomadurez en el área de captura;  **$P_0$**  es el rango del potencial inicial del petróleo (concentración de materia orgánica que puede ser transformada en fluidos del petróleo a elevadas temperaturas); **PGI** es el índice de generación de petróleo (fracción de fluidos del petróleo formados en la roca fuente y que han sido expelidos hacia el prospecto). Por ejemplo, si el reservorio del prospecto de interés están suprayacentes a la roca fuente, solo el petróleo

expulsado hacia arriba será incluido en  $PEE_n$  (Platte Rivers Associates, 2006).

El volumen de petróleo perdido ( $V_L$ ) a lo largo de la ruta de migración es calculado de la siguiente forma:

$$V_L = \Phi f V_D \quad (2)$$

En donde  $\Phi$  es porosidad, y  $f$  es la saturación residual, y  $V_D$  es el volumen de la roca por el cual el petróleo fluye. El volumen del petróleo por pérdida es proporcional al volumen del poro por el cual el petróleo fluye (Mackenzie y Quigley, 1988). El volumen de la roca que constituye la ruta de migración es llamado volumen drenado ( $V_D$ ). El volumen de la carga de petróleo liberado hacia el prospecto ( $V_C$ ) es una diferencia entre el volumen expulsado ( $V_E$ ) y el volumen perdido ( $V_L$ ).

Entonces:

$$V_C = V_E - V_L \quad (3)$$

Cuando el volumen perdido excede al volumen expulsado, no predice que el petróleo alcance al prospecto. (Podría inferirse que la trampa está seca).

### **Ley de Darcy**

La ley de Darcy es la fórmula universal para el flujo del fluido de una fase a través del medio poroso. Basado en esto, es definida la carga específica,  $V$ :

$$V = V/A$$

Estas observaciones resultaron en una nueva forma de la ley de Darcy:

$$V = -Kpg/\mu * dh/dl$$

El parámetro  $k$ , llamado permeabilidad, es una función netamente del suelo o la roca, y  $p$  y  $\mu$  son únicamente funciones del fluido. Todas son cantidades medibles. La ley de Darcy es definitivamente no válida para flujos muy altos, tales como los que se encuentran en las calizas “karstic” y dolomitas. Así como

también para fluidos extremadamente lentos tales como son los encontrados en lutitas no fracturadas (Platte Rivers Associates, 2006).

### La ecuación de la continuidad

Es simplemente la declaración de que la cantidad total de fluidos es conservado; la velocidad neta de la masa del fluido dentro de cualquier elemento de volumen tiene que ser igual a la tasa de tiempo del cambio de la masa de fluido en el elemento (Platte Rivers Associates, 2006).

$$-\frac{\partial (\rho_f v)}{\partial z} = \frac{\partial (\rho_f \Phi)}{\partial t}$$

Donde:

$\rho_f$  = densidad del fluido, el kg/m<sup>3</sup>

$V$  = descarga específica, m/seg

$\Phi$  = porosidad, dimensionalidad

### Ecuación del flujo transitorio

Cuando es combinada la ecuación de la continuidad con la ley de Darcy el resultado es la ecuación del flujo transitorio

$$\alpha_b \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{\mu} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{Q}{\rho_f^2 g} + \alpha_b \rho_b \frac{\partial s}{\partial t}$$

En donde:

$\alpha_b$  = la compresibilidad de la masa, m<sup>2</sup>/N

$h$  = cabeza hidráulica, m

$K$  = permeabilidad, m<sup>2</sup>

$\mu$  = viscosidad del fluido, Nseg/m<sup>2</sup>

$Q$  = fuente/hundimiento, Kg/seg m<sup>3</sup>

$\rho_f$  = densidad del fluido, Kg/m<sup>3</sup>

$g$  = aceleración gravitacional 9.81m/seg<sup>2</sup>

$\alpha_0$  = compresibilidad de la masa en la superficie, m<sup>2</sup>/N

$\rho_b$  = densidad de la masa, Kg/m<sup>3</sup>

$s$  = tasa de sedimentación, m/seg

La ecuación del flujo de fluido transitorio es un caso especial de la ecuación de difusión transitoria. Es un valor inicial y marginal de la ecuación diferencial parcial con coeficientes no constantes. (Platte Rivers Associates, 2006).

### **Viscosidad**

La viscosidad del agua es bastante dependiente de la temperatura, pero es mucho menos dependiente sobre la presión. La viscosidad es modelada en un rango de temperatura entre 20 a 300 grados centígrados (Platte Rivers Associates, 1995).

$$\log_{10} \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = [1.3272 (20-T) - 0.001053 (T-20)^2] / (T+105)$$

## **Procesos generados por los modelos**

### **Compactación**

La compactación controla esencialmente la porosidad (ignorando los efectos diagenéticos) durante el soterramiento, lo cual afecta el tiempo de la madurez, la generación y expulsión. Los efectos de la corrección de la compactación variarán dependiendo del uso de gradientes geotérmicos o flujos de calor para el modelo termal.

Con el flujo de calor, la porosidad afecta directamente la conductividad. Mientras mayor sea la porosidad, mayor será la cantidad de agua en la roca, donde el agua presenta

una conductividad más baja que la roca, el efecto completo será una disminución de la conductividad, resultando un aumento de la temperatura (Platte Rivers Associates, 2006).

## Modelado termal

La madurez, como la mayoría de los procesos químicos y físicos, es una función de la temperatura del querógeno, y el tiempo bajo el cual ha sido expuesto a esa temperatura. Para ello es necesario conocer la historia de la temperatura de una roca madre en particular. La temperatura en el subsuelo, en la ausencia de transporte de calor lateral y fricción local, calor radioactivo o calor ígneo, es una función sencilla del flujo de calor del manto y la conductividad térmica de las rocas (figura 6). El flujo de calor ( $q$  milliwatts/m<sup>2</sup>) es la cantidad de calor que pasa por la corteza de las rocas que componen las zonas más profundas de la tierra, las cuales presentan altas temperaturas (estimado como 1335 °C en la base de la corteza) a las rocas ubicadas en la superficie. A través del diagrama de madurez termal, son realizadas interpretaciones de la madurez de determinada roca madre a una cierta profundidad (Platte Rivers Associates, 2006). (Ver figura 6).

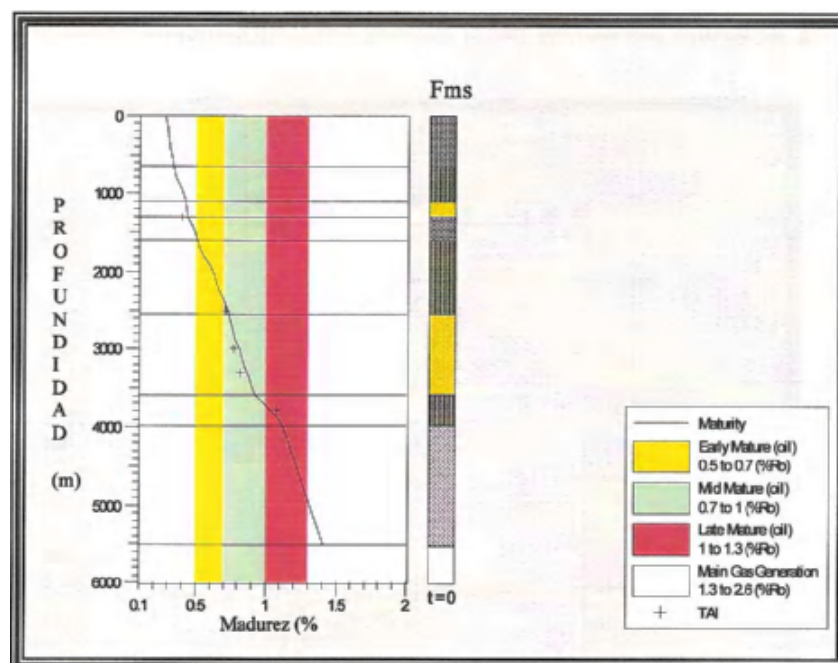


Figura 6. Madurez termal actual, calibración

## Generación

La generación de hidrocarburos podrá ser determinada haciendo uso de los diagramas de generación de hidrocarburos (petróleo o gas) obtenidos mediante de la cinética del querógeno. De esta manera son obtenidos los volúmenes acumulados y generados en un tiempo “t” (Ver figura 7). La relación de transformación, permite medir porcentualmente el hidrocarburo generado con respecto al máximo de hidrocarburos que podría ser generado, siendo esto independiente de algunas variables como el contenido de carbono orgánico en la roca generadora, dependiendo así de la cinética del querógeno. En el caso de la Formación La Luna permite diferenciar entre la generación de hidrocarburos líquidos y gaseosos (Llanos, 2000).

Los límites de generación son divididos en base al porcentaje de transformación que presente la roca, ó dicho en otras palabras en porcentaje de la materia orgánica que se ha transformado en hidrocarburos (Llanos, 2000).

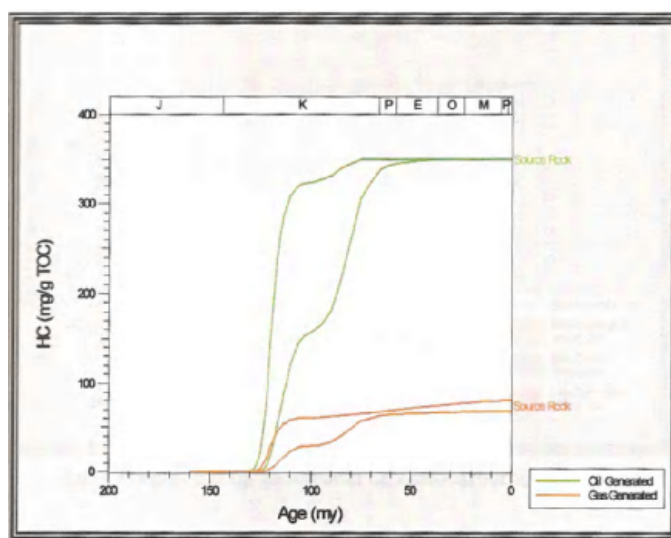
Límites de generación:

- 1 Generación temprana de hidrocarburos: 10% al 25% de transformación.
- 2 Generación principal de hidrocarburos: 25% al 65% de transformación.
- 3

tardía

: 65% al

n.

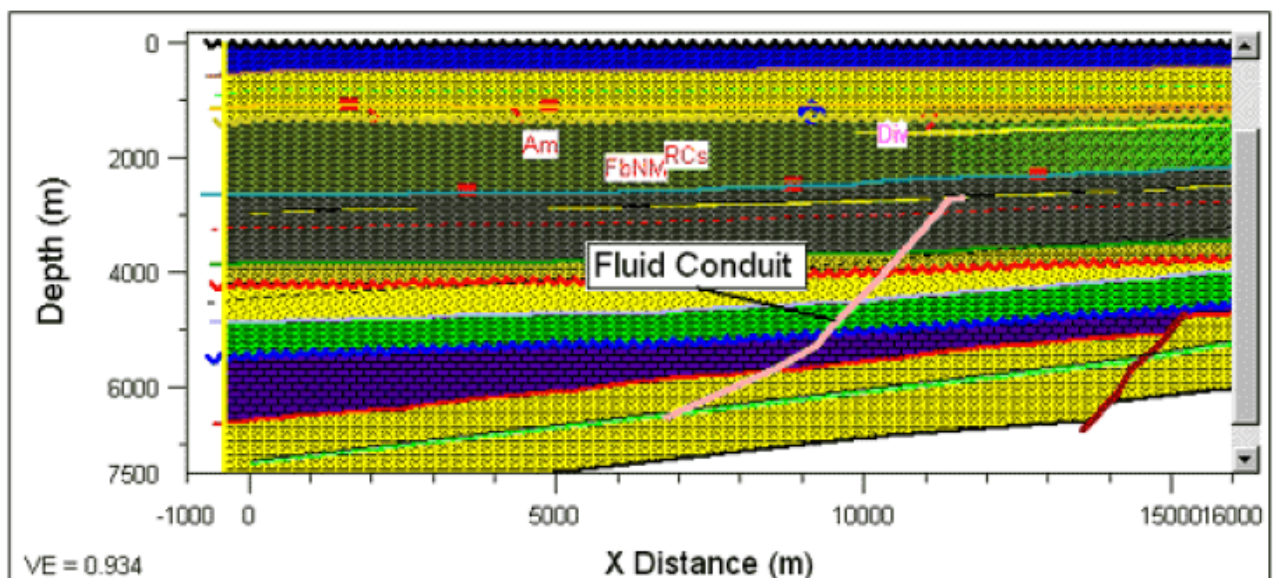


Generación  
de  
hidrocarburos  
90% de  
transformación

**Figura 7.** Generación de hidrocarburos para el tope y la base de la formación

**Expulsión:** Las edades de expulsión son calculadas utilizando el método de saturación de la roca por hidrocarburo.

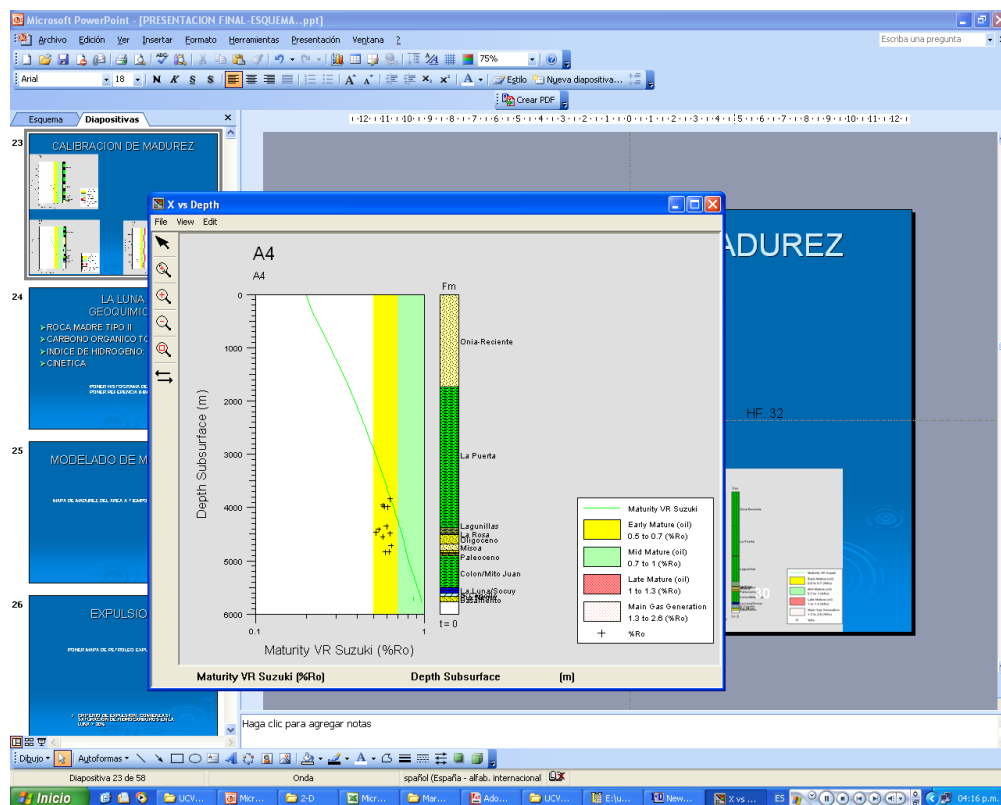
**Migración:** El modelo 2- se basa en la caracterización de la sección por un mallado de celdas, las cuales tienen sus atributos propios dados por sus características litológicas, grado de compactación y el campo de presión y temperatura a través del tiempo geológico. El modelado de la migración se realiza con la simulación del movimiento de fluidos entre celdas contiguas del modelo 2-D. Para la interpretación de la migración, existe una característica especial que consiste en un conjunto de celdas que se extienden desde un punto A hasta un punto B (Ver figura 8). Un conducto de fluido puede ser asignado a diferentes vías y eventos a medida que el fluido las atraviesa. A medida que se establezca un gran número de celdas, habrá una mayor resolución en el modelado de la migración. (Platte Rivers Associates, 2006).



**Figura 8.** (Vías de migración Platte River Associates, 2006)

## Calibración de la madurez

Es el procedimiento necesario para disminuir las diferencias existentes entre los valores medidos considerados como valores reales y los resultados obtenidos del modelado, evitando así perder la relación con la realidad geológica. Para lograr la calibración del modelo es necesario hacer uso de ciertos parámetros, los cuales diversos autores recomiendan la combinación de dos juegos independientes, uno derivado de los índices de madurez y otro de la geotermometría. De esta forma utilizando datos de reflectancia de vitrinita y temperaturas de fondo de pozo (BHT) es realizado el proceso de calibración. (Platte Rivers Associates, 1995). En donde basado en el diagrama Profundidad vs Temperatura (utilizando el flujo de calor correspondiente) (Ver Fig. 9) es considerado que hay una mediana calibración.



**Figura 9.** Curva de calibración pozo A4 (Modelo Basinmod, 2008)

## **Geología Regional**

### **Sedimentación del Jurásico**

El comienzo de la sucesión sedimentaria comienza con una etapa del “rift” o apertura en el Jurásico atribuido a la fragmentación del Pangea. El Triásico sedimentario no está presente en Venezuela, o al menos, no hay evidencia de ello. Las rocas sedimentarias más antiguas del Sistema Mesozoico las constituyen El Grupo La Gé en Perijá donde es incluida la sedimentación de la Formación La Quinta, presente en gran parte de la Cuenca de Maracaibo.

### **Sedimentación del Cretácico**

La sedimentación en el Cretácico Temprano comienza con la depositación de las areniscas de la Formación Río Negro (Neocomiense-Barreniense) controlada por surcos evidenciados por espesores variables, los cuales tienen más de 2 km hacia el surco de Machiques y sólo algunos metros hacia el flanco Norandino (Schlumberger, 1997).

Ambientes marinos de escasa profundidad durante el Aptiense temprano y medio fueron desarrollados generando las calizas correspondientes al intervalo inferior de la Formación Apón, denominado Miembro Tibú (González de Juana *et al*, 1980). A finales del Aptiense es producida la sedimentación de intervalos delgados de lutitas dolomíticas,

denominadas como Miembro Guáimaro de la Formación Apón que es extendida sobre la mayor parte de la plataforma de Maracaibo y en grandes extensiones del frente andino (González de Juana *et al*, 1980). Una notable subsidencia ocurre en la parte central del surco de Machiques produciendo una sedimentación caracterizada por lutitas calcáreas laminares y oscuras denominadas Miembro Machiques de la Formación Apón, con relativa poca extensión superficial hacia el oeste de la Cuenca de Maracaibo, presentando características de la roca madre (Guaquirian, 2000). En los comienzos del Albiense se reanuda una circulación

normal marina dando el paso a la depositación de las calizas plataformales del Miembro Piché (parte occidental de la cuenca) a diferencia del suroeste andino

donde la erosión del borde septentrional fue la fuente de arenas y lutitas con calizas grises denominadas como Formación Aguardiente. Para el Albiense medio es generada una depositación peculiar de areniscas glauconíticas y calizas coquinoideas depositándose entonces la Formación Lisure donde el contenido de carbonatos es notable hacia el norte debido a la continua transgresión marina hacia el sur. Finalizando el Albiense una delgada capa de calizas fosilíferas de la Formación Maraca marca el comienzo de una extensa subsidencia regional la cual va a definir cambios litológicos de importancia. Estas calizas constituyen depósitos de ambientes nerítico-costeros, lo cual define para el Cenomaniense un contraste con las calizas negras y lutitas ricas en materia orgánica de la Formación La Luna.

El contraste litológico evidenciado es debido a una rápida profundización del fondo marino definiendo la depositación de sedimentos pelágicos en un contorno euxínico, dados por los depósitos de la Formación La Luna (González de Juana *et al*, 1980). En la Cuenca de Maracaibo estas condiciones fueron duraderas y en éste período es alcanzada la transgresión máxima evidenciado en la Formación La Luna.

Para el Campaniense existen evidencias del comienzo de la regresión dada gradualmente por la sedimentación del Miembro Tres Esquinas de la Formación La Luna y el Miembro Socuy de la Formación Colón.

La Formación La Luna es considerada la roca fuente, depositada en un ambiente bajo condiciones anóxicas y modificado debido a los intermitentes períodos de oxigenación y los diferentes eventos tectónicos (Escalona et al, 2006). El período de depositación duró aproximadamente 20 Ma, extendiéndose desde el Cenomaniense hasta el Campaniense.

La Formación Colón es considerada como un conjunto espeso de lutitas el cual es seguido por la sedimentación de areniscas calcáreas de grano fino, limolitas de la Formación Mito Juan donde el contacto entre las dos formaciones es difícilmente reconocible (González de Juana *et al*, 1980). Esta sedimentación es notable para finales del Campaniense hasta el Maastrichtiense culminando así la sedimentación durante el Mesozoico.

Algunas estructuras presentes en la Cuenca de Maracaibo durante el Cretácico fueron formadas durante el levantamiento tectónico del oeste y las cordilleras centrales de Colombia. Este levantamiento es el responsable de incrementar la tasa de subsidencia a finales del Cretácico como el resultado de la depositación de una lutita marina perteneciente a la Formación Colón durante el Maastrichtiense (Lugo y Mann, 1995).

La Formación Colón Mito/Mito Juan fue depositada en una cuenca antepaís y está compuesta principalmente por clásticos. Es inferido que la formación fue depositada en una región distal de la cuenca antepaís, como el resultado de la colisión del Arco del Caribe con el noroeste de Sur América (Mann et al, 2006).

Es importante destacar que en la Cuenca de Maracaibo, la Formación Colón es transicional hasta solaparse con la Formación Mito Juan la cual fue depositada bajo condiciones salobres, ambiente sedimentario del tipo marino. El descenso relativo del nivel del mar a finales del Cretácico-Paleoceno es la razón principal de la presencia de facies regresivas observadas en la Cuenca de Maracaibo en la actualidad (Lugo, 1991).

## **Sedimentación del Cenozoico**

Durante finales del Cretácico al Paleoceno Temprano Venezuela occidental es afectada por la colisión de la Placa de Nazca (Océano Pacífico) y el occidente de Colombia.

Durante el Paleoceno en el Lago de Maracaibo y la región hacia el NO de Zulia es evidenciada una sedimentación caracterizada por bancos calcáreos interdigitados con facies clásticas francamente marinas, progradando sobre los ambientes regresivos (Schlumberger, 1997).

En este sector es desarrollada una provincia de plataforma (González de Juana *et al*, 1980) representada por la Formación Guasare, sedimentada en una zona nerítica y constituida por intercalaciones de areniscas calcáreas y no calcáreas, lutitas e intervalos menores de calizas localmente conchíferas. En la parte noroeste de la cuenca aparece una formación con numerosas capas de carbón, indicativas de un ambiente parálico denominada Formación Marcelina (González de Juana *et al*, 1980).

Durante el Eoceno Temprano continua la regresión del Ciclo Terciario inferior y la progradación deltaica del oeste avanza desapareciendo las calizas de plataforma. Comienza la aparición de una provincia de sedimentación básicamente fluvial la cual cubre toda la Cuenca de Maracaibo.

Hacia la región oeste, noroeste de la cuenca es desarrollada una provincia deltaica donde se sedimenta la Formación Misoa considerada al igual de la Formación Mirador parte de un complejo fluvio-deltaico con una fuente de sedimentos con dirección sur-suroeste, donde el avance del abanico deltaico tenía lugar hacia el norte-noreste. La Formación Misoa presenta unidades sedimentarias que indican un ambiente de transición, es decir, el paso de un margen pasivo a un margen activo. Ésta transición coincide con el

emplazamiento de las Napas de Lara hacia el suroeste, ocurrido en el Eoceno (medio-tardío) (Lugo, 1991).

Durante estos períodos de avance son conocidos intervalos lutíticos poco profundos o deltaico-marinos que se hacen importantes hacia el norte y noreste indicando mayor influencia marina hacia ésta dirección. Característica importante es el aumento en el espesor de las areniscas hacia el norte-noreste. El modelo sedimentario que es postulado es el continuo avance y retroceso recurrente de las aguas (González de Juana *et al*, 1980). Para el Eoceno Medio inicial la sedimentación de la Formación Misoa continua así como la progradación deltaica y comienza a considerarse un cambio paleográfico debido al levantamiento de las tierras generando cambios positivos y generando zonas erosivas (González de Juana *et al*, 1980).

La erosión característica del Eoceno Tardío continúa durante el Oligoceno, representado por la sedimentación de la Formación La Sierra catalogados como sedimentos continentales. Caracterizada por areniscas, limolitas y algunas lutitas, ocasionalmente conglomerados, láminas de lignito y raras delgadas capas de carbón (González de Juana *et al*, 1980).

Basado en la revisión bibliográfica realizada, durante el Oligoceno continúa la colisión del Gran Arco con el margen pasivo y comienza la formación de la cuenca antepaís al este de Venezuela, es decir, el mismo proceso tectónico que dio origen a la cuenca antepaís correspondiente al Paleógeno (Pindell et al, 1990).

Durante el Oligoceno la acumulación de sedimentos en la Cuenca de Maracaibo fue preservada mayormente hacia sus flancos (Schlumberger, 1997).

En estudios realizados en el sur de la Cuenca de Maracaibo utilizando datos inferidos de pozos y datos sísmicos en tres dimensiones, durante el análisis de tectonosecuencias correspondientes al Oligoceno-Mioceno, las unidades sedimentarias reflejan la transición de una sedimentación de carácter regresiva, definida así por facies fluviales (Mann et al, 2006) .

El comienzo de la sedimentación miocena está caracterizada por una transgresión marina de considerable extensión territorial en la Cuenca de Maracaibo pero de corta duración (González de Juana *et al*, 1980). Esta representada por el Grupo El Fausto donde su unidad basal es denominada Formación Ceibote, de carácter arenoso. En el sector noreste de la Cuenca de Maracaibo la sección superior de la secuencia Mioceno es conocida con el nombre de Formación La Villa de carácter continental.

## **Tectónica Regional**

### **“Rift” Triásico-Jurásico.**

La ruptura Triásico-Jurásico de Pangea, dada anteriormente por la clausura del mar de Iapetus a finales del Paleozoico, comienza por la generación de grabens y volcanismo asociado, donde en Sur América se identifican de manera notable en la configuración de los depósitos de la cuenca (Castillo, 1995).

### **Tectónica de Retroarco. Margen Pasivo Cretácico**

Al este de la Cordillera Central de Colombia es generada una cuenca de retroarco el cual está rellena por clásticos continentales (Formación Río Negro) y durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano la Cuenca de Maracaibo formó parte de éste retroarco (Castillo, 1995). Pero debido a la lejanía con respecto al eje del retroarco se ha considerado la sedimentación de un margen

pasivo, además el Arco de Mérida ejerce un control sobre la sedimentación (Lugo y Mann, 1995) y esto está definido por la ubicación de la Formación Río Negro.

### **Tectónica Paleoceno-Eoceno-Mioceno. Margen activo**

A finales del Cretácico y comienzo del Paleoceno la subsidencia al oeste es más pronunciada dado al continuo levantamiento de la Cordillera Central de Colombia y en consecuencia la cuenca de retroarco se convierte en una cuenca antepaís (foreland basin). Esto tiene como consecuencia que los espesores de las formaciones Mito, Juan, Colón y Marcelina aumenten progresivamente (Castillo, 2001).

Durante el Eoceno persiste la compresión regional de oeste a este debido al movimiento de la placa del Caribe contra la placa de Sur América,

pero en éste tiempo, el control tectónico importante es el emplazamiento de las napas de Lara (Castillo, 2001) lo que genera una antefosa en Zulia oriental y nororiental, fallas normales con buzamiento hacia el norte-noreste así como fallas preexistentes reactivadas como Tigre/Cachiri, La Paz, Urdaneta Oeste, Urdaneta, Icotea, Pueblo Viejo y Begote. Define también la reactivación de la flexura o alto periférico en la zona central de la cuenca.

Evento de gran importancia durante el Oligoceno al presente fue la Orogénesis Andina la cual afectó la secuencia Eoceno obteniendo una gran importancia en la evolución erosiva.

La erosión posteocena en la cuenca, relacionada a la deformación e inversión parcial de la cuenca removió una gran parte importante de la secuencia Eoceno incluyendo la secuencia del Eoceno Superior, en grandes áreas de la cuenca.

Las deformaciones andinas del Mioceno, causadas por el choque del arco de Panamá con Sur América, fueron intensas. En Colombia son formadas la Cordillera Oriental y en Venezuela creó la antefosa andina en parte del área de estudio y una intensa inversión estructural a lo largo de grandes fallas en Zulia Oriental.

La deformación más significativa tiende a estar cerca de 10,2 Ma . Pero el evento compresional más significativo en el área comienza a mediados del Mioceno y continua hasta el presente denominado como ciclo Andino. La compresión direccionada este-sur-este entre la convergencia de las placas Pacífica y Sur Americana genera como consecuencia el levantamiento de Perijá y los Andes Venezolanos generando las mayores trampas estructurales en el occidente de la Cuenca de Maracaibo (Castillo, 2001).

## **Geoquímica Regional**

En este capítulo son resumidas las principales características geoquímicas de las rocas generadoras ubicadas dentro de la Cuenca de Maracaibo.

La Cuenca de Maracaibo ocupa un área de 50.000 Km<sup>2</sup>. La evaluación de las rocas madres está basada en estudios geoquímicos regionales realizados durante los últimos 15 años.

Las acumulaciones de petróleo y gas en la Cuenca de Maracaibo están relacionadas a dos sistemas petroleros (Talukdar y Marciano, 1994).

El principal sistema petrolero, contribuye con más del 98% del total de las reservas de petróleo, e involucra la relación genética entre el Cretácico Superior representado por La Luna como roca fuente y el resultado de las diferentes acumulaciones de petróleo, la Formación Misoa corresponde a la roca reservorio principal (Talukdar y Marcano, 1994).

El sistema petrolero de mayor importancia desde el punto de vista económico está a finales del Cretácico dentro de la Formación La Luna la cual contiene la roca fuente del sistema petrolero La Luna-Misoa (i). La roca fuente fue depositada bajo condiciones anóxicas durante la transgresión marina en un ambiente de plataforma media a externa con el incremento del nivel del mar a finales del Cretácico. Está compuesta principalmente por calizas, lutitas calcáreas y grandes cantidades de materia orgánica. El petróleo corresponde a un kerógeno tipo II enriquecido en hidrógeno (Talukdar y Marcano, 1994)

El espesor de la Formación La Luna varía entre 75 a 150m y el espesor de la roca fuente es de un tercio a dos tercios del espesor total (Blaser y White, 1984).

El otro sistema petrolero que se incluye dentro de la Cuenca de Maracaibo se ubica en el Maastrichtiense-Paleoceno Superior en el Grupo Orocue (Roca Madre accesoria) representada por lutitas carbonosas y carbones (Alberdi *et al.*, 1994), la Formación Carbonera (Roca Madre Secundaria) de edad Oligoceno esta constituida por carbones con un alto índice de hidrogeno (HI) del tipo I, ricos en exinita y alginita (Alberdi *et al.*, 1994). En el área de estudio únicamente se considero la roca madre La Luna.

En el Cretácico también existe otra roca con potencial generador como lo es el Miembro Machiques de la Formación Apón, el cual presenta excelentes niveles de materia orgánica marina, pero de muy limitada extensión geográfica

(Alberdi *et al.*, 1994), lo cual permite descartarla como roca madre principal en el área de estudio.

El promedio del carbono orgánico total original de La Luna como roca fuente es de 5.6% en la Cuenca de Maracaibo (Talukdar y Marciano, 1994).

En general, el sur de Lago de Maracaibo presenta una tendencia a mayores valores de madurez (%Ro) en la dirección hacia la antefosa nor andina; este es un hecho que se percibe prácticamente durante todo el período posterior al levantamiento de los Andes (Llanos, 2000).

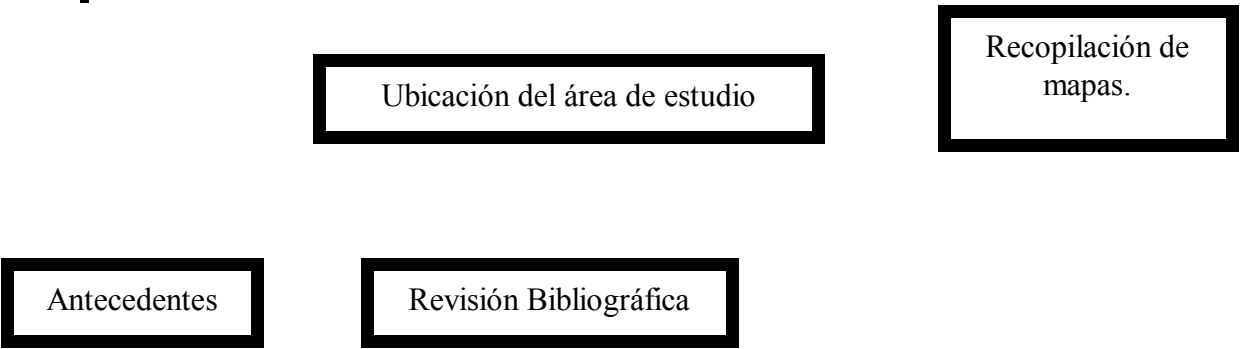
## **Metodología**

Para el desarrollo de la metodología del trabajo propuesto fueron establecidas una serie de pautas de acuerdo al siguiente orden:

### **Parte I: Búsqueda de información**

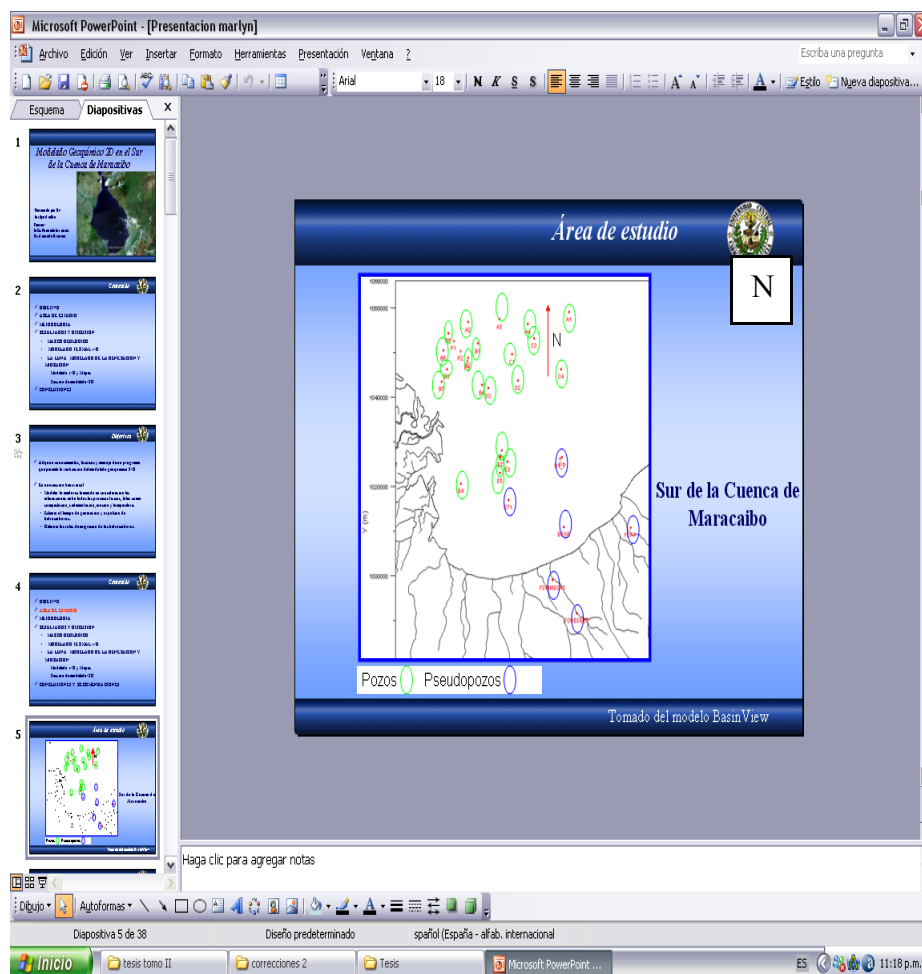
La búsqueda de información es considerada como la primera etapa y la más fundamental, ya que permite el conocimiento del contexto geológico

regional y local de la zona de estudio. A través de trabajos previos, fue posible conocer y recopilar a su vez información existente en la Cuenca de Maracaibo, más específicamente al sur del Lago (Ver figura 10)



**Figura 10: Búsqueda de la información.**

**Parte II:** recopilación de datos provenientes de los pozos obtenidos por Llanos (2000). Para la realización del modelado geoquímico fueron seleccionados 21 pozos y 6 puntos ficticios (Ver figura 11).



**Figura 11: Ubicación de pozos**

Es importante resaltar que los datos pertenecientes a los pozos, las formaciones que se atraviesan en los pozos o interpretadas en los puntos ficticios, son tipo (erosión, depositación o formación), edad del comienzo de sedimentación, profundidad de topes, espesores erosionados y la litología correspondiente (Ver anexos). Con base al pozo que contiene el mayor número de formaciones, se procede a renombrarlas, ya que las existentes poseían nombres asociados a límites de secuencia (Ver Tabla # 2), que fueron obtenidas en base a la interpretación sismoestratigráfica realizada en la zona de estudio e integrada en la información de Llanos ,2000.

| Edad (M.a)<br>(Llanos,2000) | Formación/Evento<br>(Llanos ,2000) | Formación/Evento<br>Usada en este proyecto | Profundidad<br>(m) |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| 5,2                         | Onia-Reciente                      | Onia-Reciente                              | 1590               |
| 10,2                        | La Puerta                          | La Puerta                                  | 3077               |

|      |                 |                      |      |
|------|-----------------|----------------------|------|
| 15   | Lagunillas      | Lagunillas           | 4108 |
| 16   | MFS.16          | Lagunillas Inferior* |      |
| 16,5 | SB 16.5 Disc    | SB 16.5 Disc         | 4155 |
| 17   | Dep 16.5        | Dep 16.5             | 4325 |
| 21   | SB 16.5         | La Rosa Superior*    |      |
| 24,8 | MFS 24.8        | La Rosa Inferior*    |      |
| 25   | SB 26 Disc      | SB 26 Disc           |      |
| 26   | Dep 26          | Dep 26               | 4333 |
| 35   | SB 26           | Oligoceno            |      |
| 36   | SB 36 Disc      | SB 36 Disc           |      |
| 37,5 | Dep 36          | Dep 36               | 4366 |
| 43,5 | SB 36           | Misoa Superior*      |      |
| 44   | SB 44 Disc      | SB 44 Disc           |      |
| 45   | Dep 44          | Dep 44               | 4448 |
| 50,5 | SB 44           | Misoa Inferior 3*    |      |
| 51,5 | SB 51.5 Disc    | SB 51.5 Disc         |      |
| 52,5 | Dep 51.5        | Dep 51.5             |      |
| 53,5 | SB 51.5         | Misoa Inferior 2*    | 4707 |
| 54   | SB 54 Disc      | SB 54 Disc           |      |
| 55   | Dep 54          | Dep 54               |      |
| 58   | SB 54           | Misoa Inferior 1*    | 4845 |
| 58,5 | SB 58 Disc      | SB 58 Disc           |      |
| 60,5 | Dep 58          | Dep 58               |      |
| 64   | SB 58           | Paleoceno*           | 4937 |
| 79   | Colon/Mito Juan | Colon/Mito Juan      | 4971 |
| 96   | La Luna/Socuy   | La Luna/Socuy        | 5468 |
| 113  | G.Cogollo       | G.Cogollo            | 5555 |
| 117  | Río Negro       | Río Negro            | 5600 |
| 160  | Basamento       | Basamento            | 5675 |

**Tabla # 2:** Estratigrafía del pozo A3

\* Nombres informales considerados de acuerdo a la estratigrafía definida en los pozos según Llanos, 2000.

Las modificaciones fueron realizadas para cada uno de los pozos considerados para el modelado, con base a la columna estratigráfica del pozo que tuviese las formaciones mucho más completas y de acuerdo a la edad del

comienzo de la sedimentación postulada por varios autores (Léxico Estratigráfico, Llanos,2000 y Cambridge,2006). De esta forma, era comparada cada una de estas edades, y relacionadas a Formaciones más conocidas. Para el modelado integrado 2-D era necesario tener los mismos nombres formacionales equivalentes en todos los pozos, los cual no se tenia originalmente en Llanos, 2000.

**Parte III:** recopilación de los datos de entrada del programa para cada pozo y punto ficticio. A continuación se muestra un esquema (Ver figura 12), que permitió la construcción de una base de datos. Valores de carbono orgánico total, porcentajes de vitrinita, temperaturas de fondo de pozo, litologías, espesores, edades absolutas y relativas de las secuencias fueron obtenidas de los datos de pozos, y de trabajos realizados en el área de estudio.

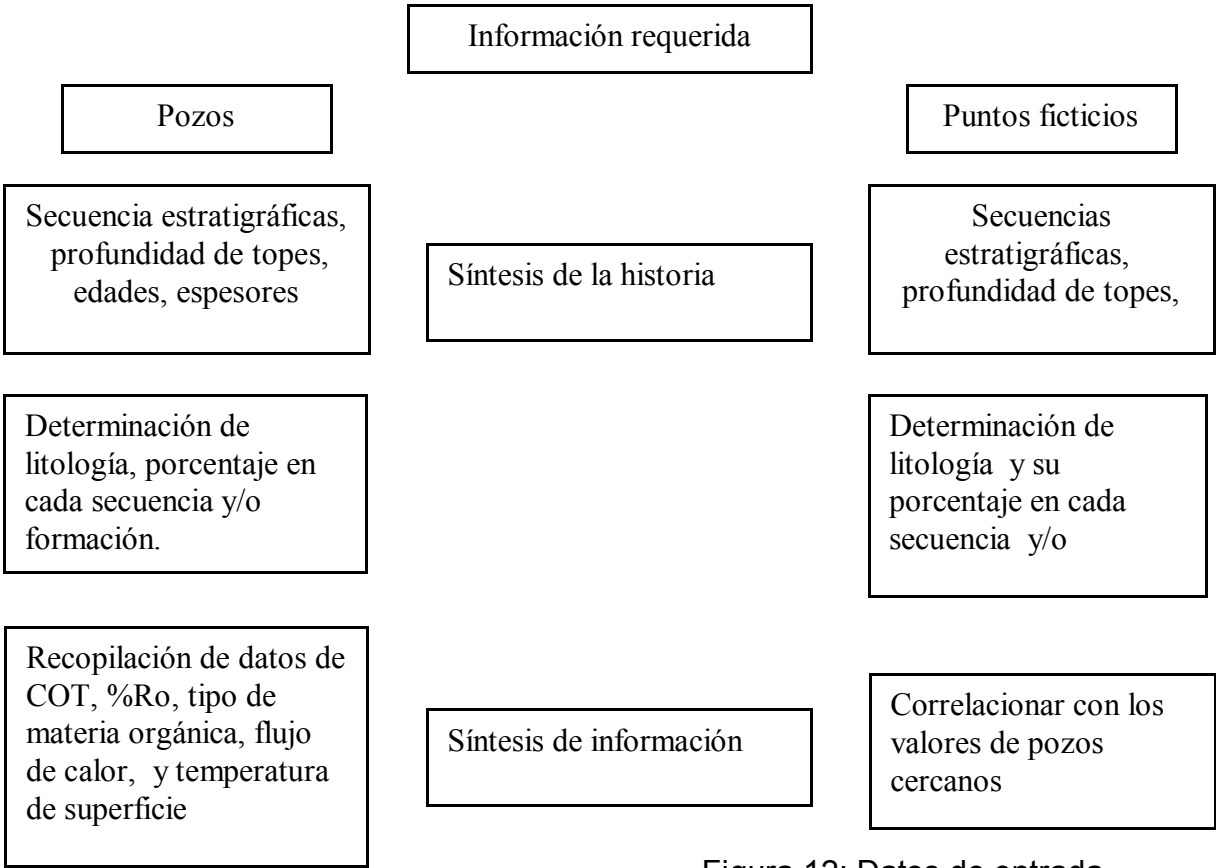
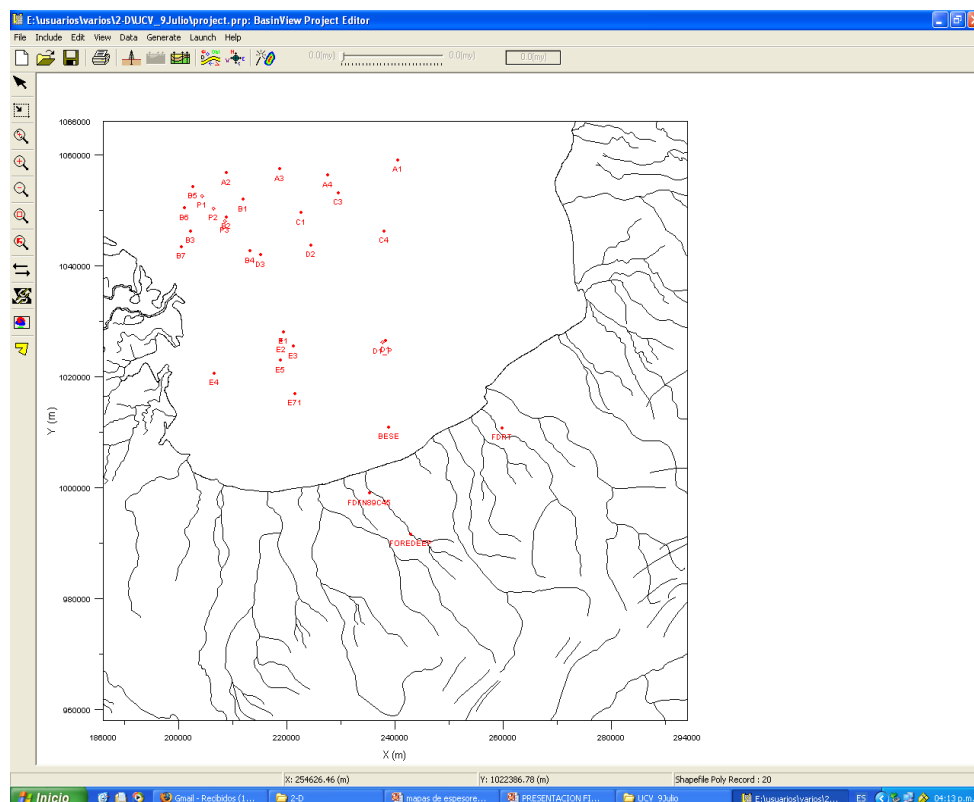


Figura 12: Datos de entrada para el modelado

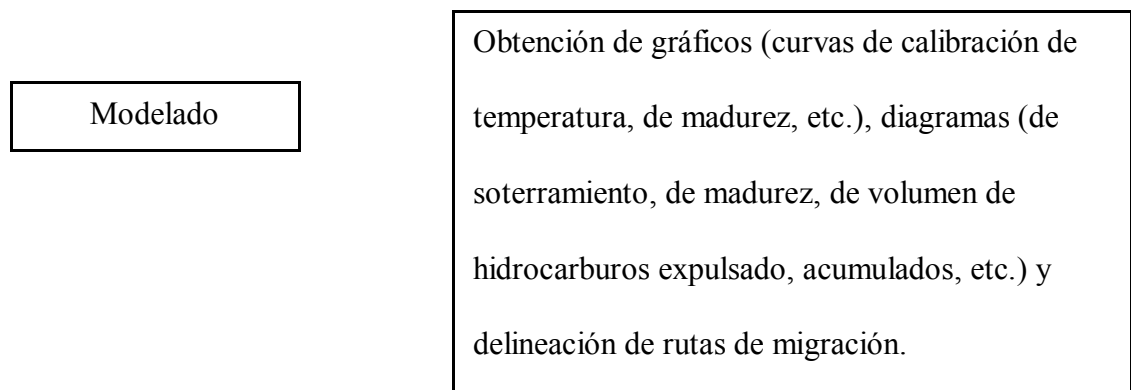
## Parte IV: Modelado de pozos (reales y ficticios)

Para la realización del modelado geoquímico fue utilizado el programa Basinmod 1D, Basinmod 2D y Basinview. El programa Basinmod 1D fue aplicado para la integración de la estratigrafía por pozo, considerando sus topes, edades y litologías, así como los espesores erosionados reportados. La elaboración de los diagramas de enterramiento y la calibración del modelo termal se realizo en cada pozo con información de temperaturas y vitrinita (ver parte V mas adelante). Posteriormente se integraron todos los pozos en BasinView, para tener la visión regional del modelo y de esta forma, poder visualizar cada una de las formaciones presentes, establecer tendencias de espesores y litologías hacia las áreas sin información y poder situar la sección transversal para la realización del modelado 2D. La sección transversal 2D seleccionada es noroeste-sureste (Ver figura 13), a lo largo del buzamiento regional del área de estudio, tratando de considerar el mayor numero de pozos cercanos.



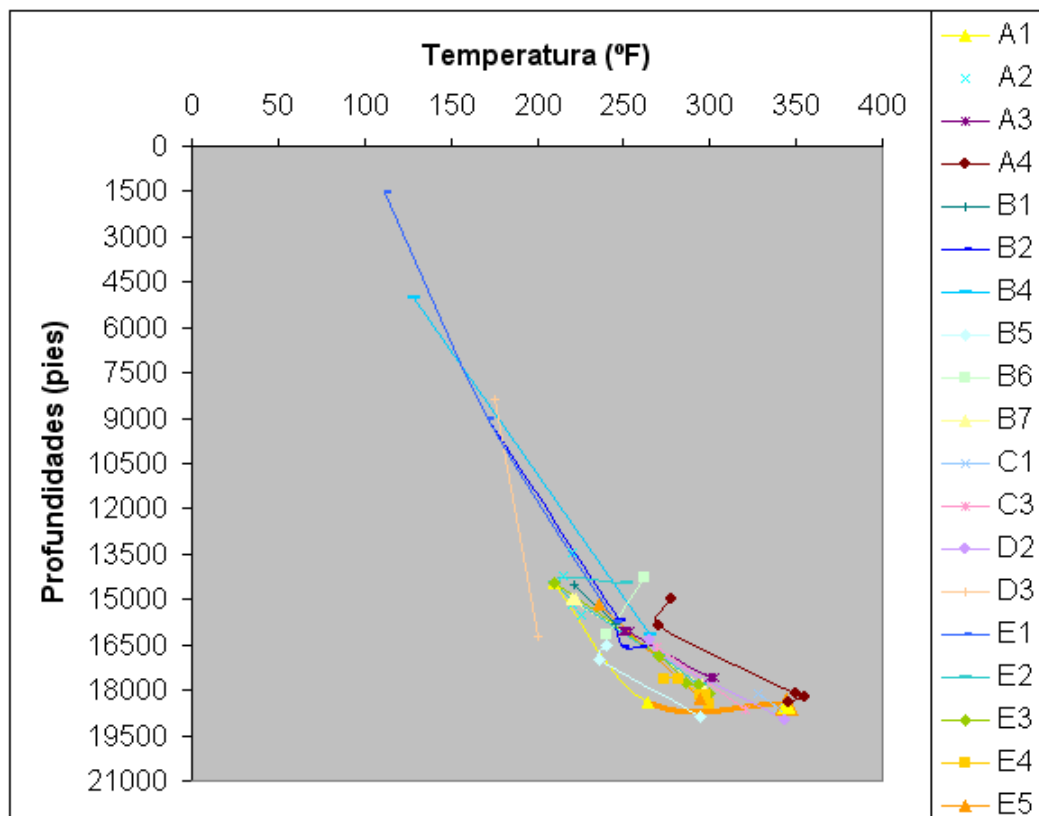
**Figura 13:** Mapa de ubicación sección transversal, (Basin view).

La selección de ésta sección transversal también considera los pozos cuya información, estuviese más completa. El objetivo es determinar mediante el modelado 1-D y 2-D, transferencias de calor, madurez, estimar los tiempos de generación y expulsión de hidrocarburos y finalmente delinear las rutas de migración. La aplicación de este modelado permitió obtener los siguientes resultados mostrados en la figura14:



**Figura 14:** Resultados obtenidos a partir del modelado con los programas Basinmod 1D y 2D

En cuanto a la historia termal, para este modelado, se tomó en cuenta el flujo de calor de seis pozos, que presentaban valores de flujo de calor calibrado en seis pozos que presentaban valores de flujo de calor que oscilaban entre 29 y 31 mW/m<sup>2</sup>, y a su vez observando las tendencias presentes con respecto al BHT (Bottom Hole Temperature) de todos los pozos (Ver figura 15) por lo que para la realización del modelado se consideró un flujo de calor constante de 30 mW/m<sup>2</sup>.

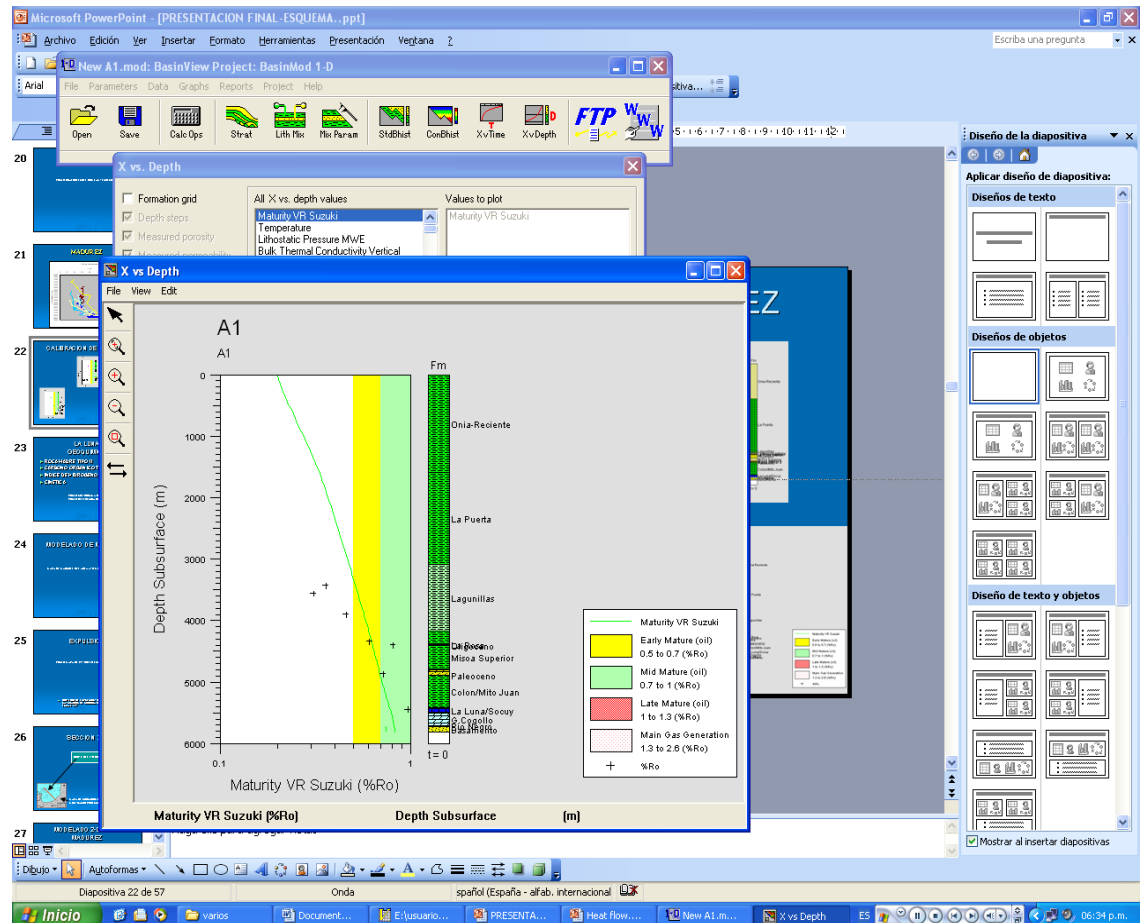


s pozos

## Parte V: Calibración del modelo

Este proceso permitió minimizar la diferencia entre los valores medidos (datos reales) y los valores calculados por el modelo para las temperaturas actuales y la madurez termal medida (%Ro), sin perder la conexión con los fenómenos geológicos que ocurrieron en la zona de estudio. La calibración es un proceso fundamental para completar el modelado de la cuenca, teniendo así una apreciación intuitiva de los procesos involucrados en el modelo calibrado. Para llevar a cabo este procedimiento se utilizan datos de temperatura y madurez como el porcentaje de vitrinita y se ajusta el flujo de calor probable de la zona de estudio, interaccionando con el modelo, hasta que la mayoría de los puntos coincida con la curva principal. La Figura 16, muestra la calibración correspondiente al pozo A2. Las calibraciones

realizadas a los pozos considerados en el modelo se encuentran en los anexos.



**Figura 16:** Calibración correspondiente al pozo A1

El uso de varios parámetros de calibración representa mayor grado de confiabilidad para calibrar la historia termal. Diversos autores han realizado énfasis que la calibración de dos juegos independientes de parámetros de calibración, por ejemplo, uno derivado de los índices de madurez y otro de la geotermometría, son necesarios para la reconstrucción confiable de temperatura (Rodríguez, 2000). Sin embargo, en este estudio solo se dispone de datos de reflectancia de la vitrinita (Ver anexos), por lo que no se considera

que el grado de confiabilidad sea alto. Por otro lado, no se disponía de información de porosidades, por lo que no se pudo calibrar el modelo de compactación, por lo que se utilizó el método de reducción de la porosidad considerado en Llanos, 2000.

Es importante considerar que las temperaturas del BHT registradas durante la rutina de perforación son más bajas que la temperatura de formación estática debido al efecto de enfriamiento por la circulación del lodo durante la perforación y el acondicionamiento del hueco. Después que cesa la circulación, las temperaturas ascienden y se aproximan a las temperaturas de formación estáticas.

## **Parte VI: Consideraciones tomadas para la realización del modelado**

La geoquímica regional de la Cuenca de Maracaibo, considera la presencia de una roca madre formada a finales del Cretácico La Luna, la cual fue considerada como roca generadora para la realización del modelado. El petróleo corresponde a un querógeno tipo II enriquecido en hidrógeno (Talukdar y Marciano, 1994).

La materia orgánica es netamente marina con algunos aportes de materia orgánica terrestre. En cuanto al porcentaje de carbono orgánico total original considerado fue de 8%, de acuerdo al estudio de Llanos, 2000. El COT original es mayor que al actual, (6%, promedio en la Cuenca) por disminución de éste durante la maduración.

La roca transportadora de los hidrocarburos expulsados corresponde a varios niveles y comprende tanto a rocas del Cretácico como del Terciario y el sello a nivel regional está representado por las lutitas de la Formación Colón.

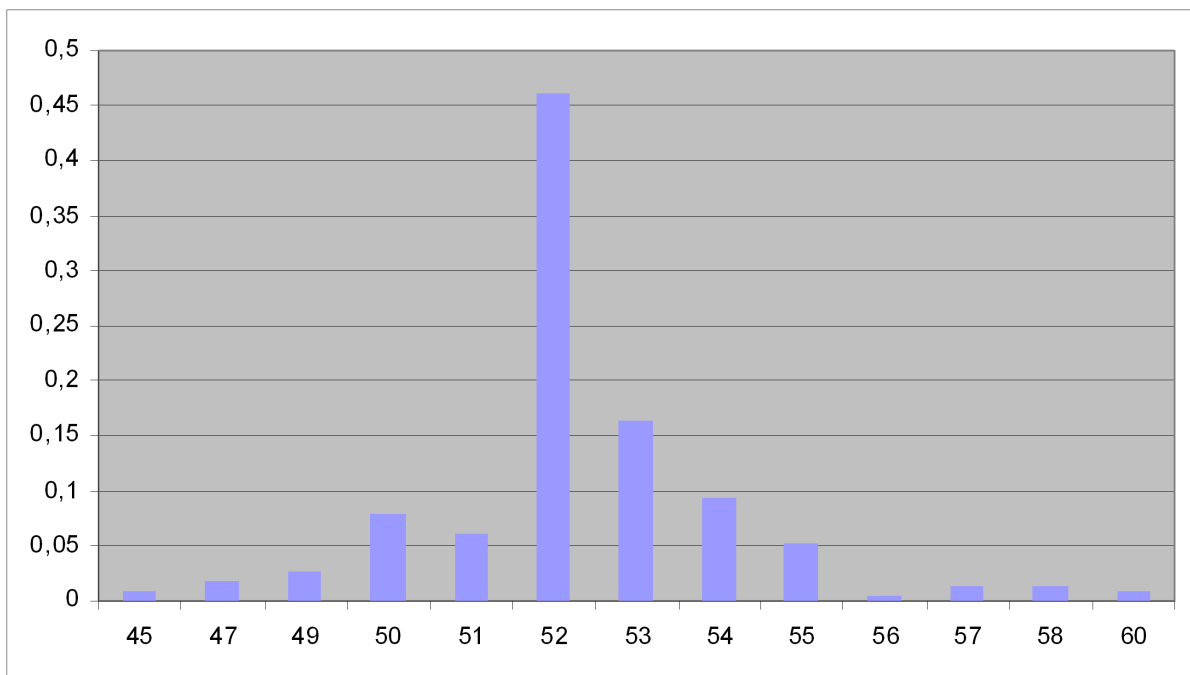
Tal como se mencionó anteriormente, el Miembro Maquiches de la Formación Apón (Alberdi et al., 1994), debido a su limitada extensión

geográfica hacia el oeste de la cuenca, se descartó como roca madre de importancia en el estudio.

## Cinética de La Luna

Con la finalidad de modelar la generación de hidrocarburos, son utilizados parámetros físico-químicos, como lo es la cinética de la roca madre. Este parámetro está relacionado a la calidad de la materia orgánica.

La Formación La Luna fue evaluada desde el punto cinético por (Sweeney et al 1980). En dicho trabajo supone para la generación de hidrocarburos una reacción del primer orden, y consistió en la determinación de las energías de activación y constante de Arrhenius para una muestra inmadura (ver Figura 17) y evaluada en cuatro distintas áreas distribuidas en la Cuenca de Maracaibo. Para el sur del Lago de Maracaibo dentro de los resultados obtenidos de este trabajo, el área es la correspondiente al grupo C.



Energía de activación, Kcal/mol

**Figura 17:** Gráfica de la cinética correspondiente a la Luna, (Swenney et al, 1980)

## **Discusión y análisis de resultados**

Para la elaboración del modelo geológico fue necesario la integración en un modelo coherente de la información estratigráfica proveniente de los datos de pozos obtenidos por Llanos, 2000. Para ello fue necesario elaborar los mapas de espesores y litológicos con la finalidad de establecer tendencias, basado en la geología a nivel regional y específicamente para el sur de la Cuenca de Maracaibo. Es importante destacar que estos mapas son de gran importancia, ya que es la base principal para el establecimiento de las tendencias en las profundidades de las formaciones y las variaciones litológicas en la sección transversal a la cual posteriormente le es aplicado el modelado 2D. Todos estos mapas, se encuentran en los anexos y fueron realizados con el programa BasinView. No es el objetivo de este trabajo la integración de los modelos sedimentarios, por lo que las tendencias mostradas en el anexo corresponden únicamente a la información proveniente de los pozos e integrada según un modelo muy limitado de información.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos, están basados en información establecida y en datos de pozos considerados en el modelo. En la tabla ( 2) se muestra un resumen de los pozos considerados en el modelo y la información incorporada de cada uno de ellos.

**Tabla #2** Resumen de datos

| Pozos | Diagramas de soterramiento | Datos de vitrinita (%Ro) | Estratigrafía | Calibraciones |
|-------|----------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| A1    | •                          | •                        | •             | •             |
| A2    | •                          | •                        | •             | •             |
| A3    | •                          |                          | •             |               |
| A4    | •                          | •                        | •             | •             |
| B1    | •                          | •                        | •             | •             |
| B2    | •                          |                          | •             |               |
| B3    | •                          |                          | •             |               |
| B4    | •                          | •                        | •             | •             |
| B5    | •                          | •                        | •             | •             |
| B6    | •                          | •                        | •             | •             |
| B7    | •                          | •                        | •             | •             |
| C1    | •                          | •                        | •             | •             |
| C3    | •                          |                          | •             |               |
| C4    | •                          |                          | •             |               |
| D2    | •                          |                          | •             |               |
| D3    |                            | •                        | •             | •             |
| E1    |                            | •                        | •             | •             |
| E2    | •                          | •                        |               | •             |
| E3    | •                          |                          | •             |               |
| E4    | •                          | •                        | •             | •             |
| E5    | •                          |                          | •             |               |

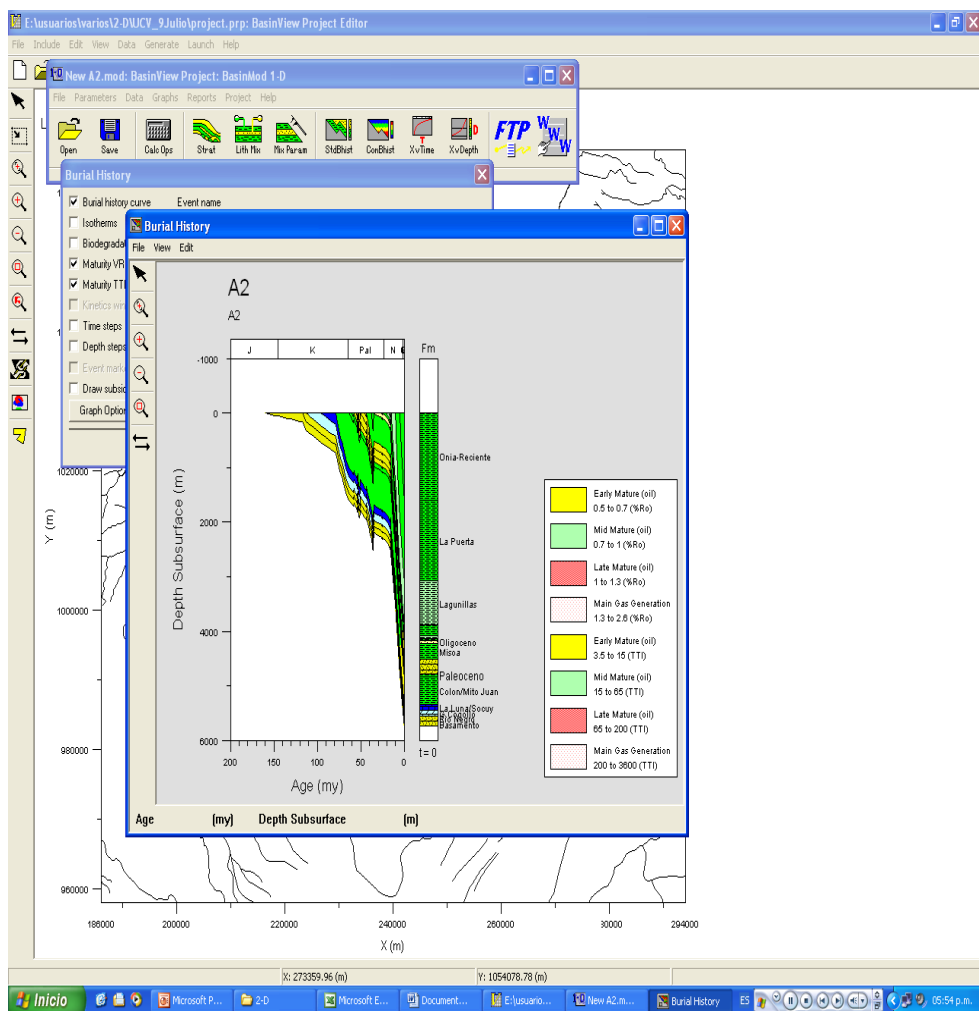
Los seis restantes corresponden a pseudopozos los cuales poseen sólo información estratigráfica (Ver anexos).

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el programa utilizado para el modelado 1D y 2D, dentro de los cuales se encuentran los diagramas de soterramiento correspondientes a dos pozos, ubicados uno a gran profundidad y otro más somero. Igualmente los diagramas de generación y expulsión en el tiempo para estos pozos. Posteriormente se muestra el resultado del modelado de la sección transversal 2D con las rutas de migración estimadas en el modelado.

### **Diagramas de soterramiento**

Los diagramas de soterramiento permiten visualizar la evolución geológica de la cuenca, en cada uno de los pozos incluidos en el modelado. En los diagramas puede ser apreciada la sedimentación de las diferentes formaciones desde hace 160 M.a, así como también las principales erosiones, eventos y discordancias. A continuación se muestran dos diagramas de soterramiento correspondientes al pozo A2, el cual es el pozo menos profundo y el “Foredeep” el cual dentro de los datos de origen es el nombre que corresponde al pozo ficticio que presenta la mayor profundidad, de 12000m. (Según datos en Llanos, 2000). Los resultados para todos los pozos y puntos ficticios considerados en el modelo se muestran en el Anexo.

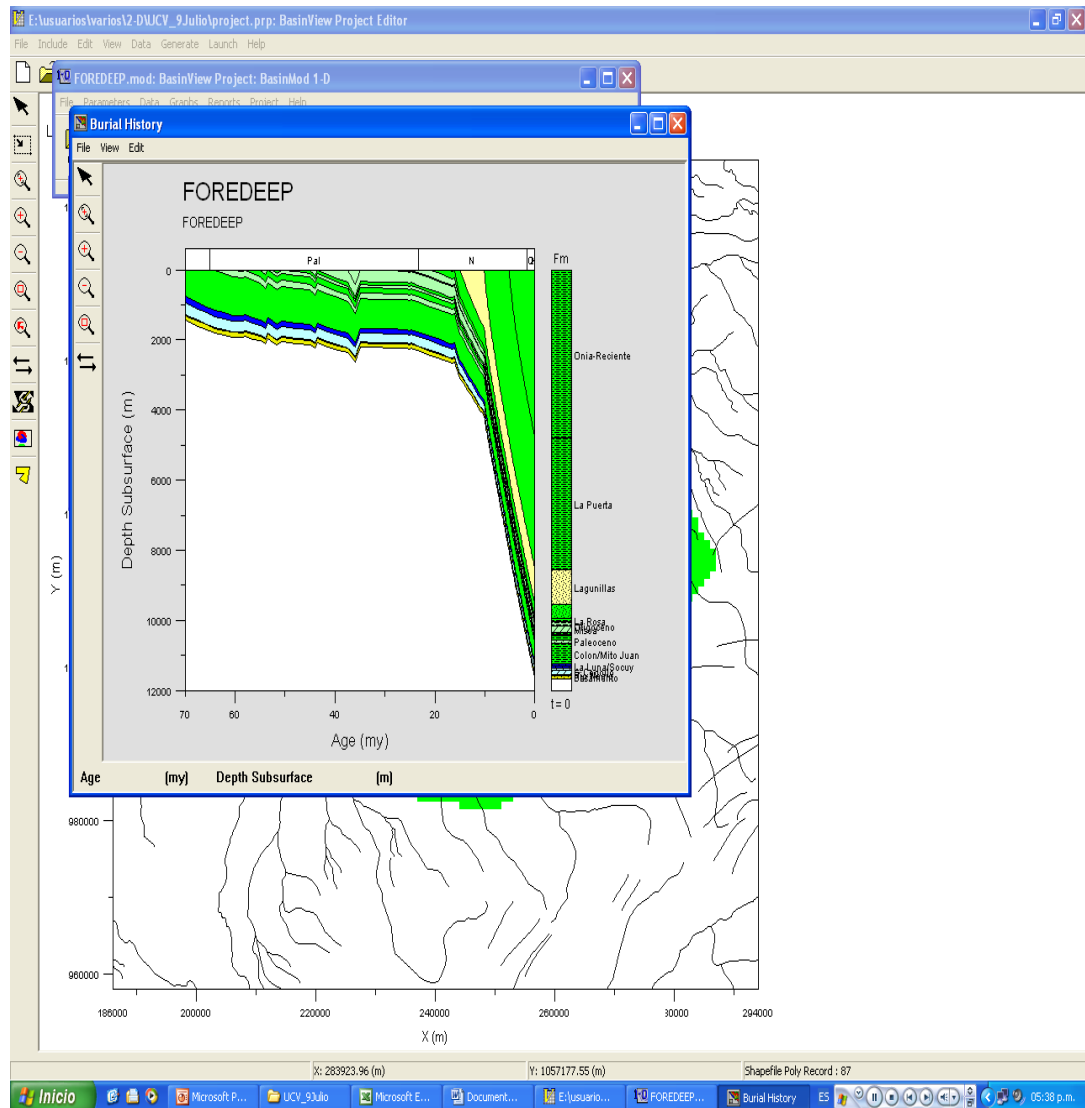
En el diagrama de soterramiento correspondiente al pozo A2 (Ver figura 18) es apreciada una sedimentación continua y progresiva de las distintas secuencias sedimentarias con una subsidencia bastante estable. Esta sedimentación es interrumpida por levantamientos que ocasionan erosiones poco significativas de las secuencias correspondientes, según los datos en Llanos, 2000 y que corresponden a eventos en el Eoceno y Oligoceno.



**Figura 18:** Diagrama de soterramiento Pozo A2

Los diagramas permiten verificar la homogeneidad de la historia geológica para el sur del Lago de Maracaibo, ya que en los puntos considerados en el modelado presentan un perfil muy similar. En el caso del pozo ficticio llamado “Foredeep” (Ver figura 19) el cual es el pozo que presenta mayor profundidad, los levantamientos y las erosiones son menores.

E  
n  
a

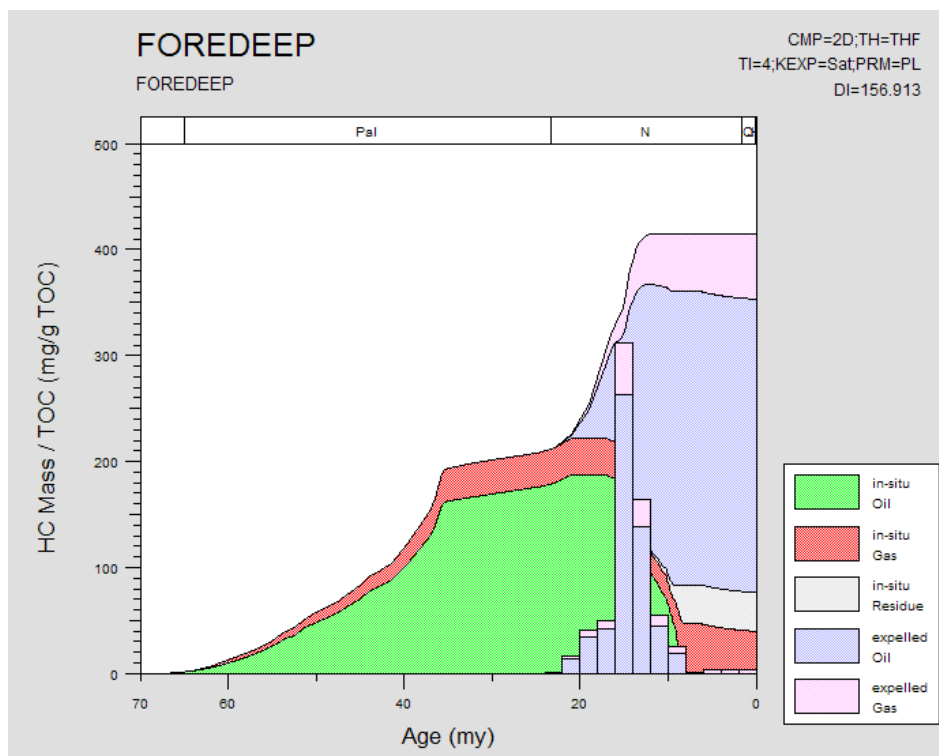


mbos pozos existe una tasa de sedimentación baja para las formaciones cretácicas y del Paleógeno y ésta se incrementa sustancialmente durante el Neógeno, principalmente por el levantamiento de los Andes.

**Figura 19:** Diagrama de soterramiento Foredeep

## **Generación y expulsión en el tiempo**

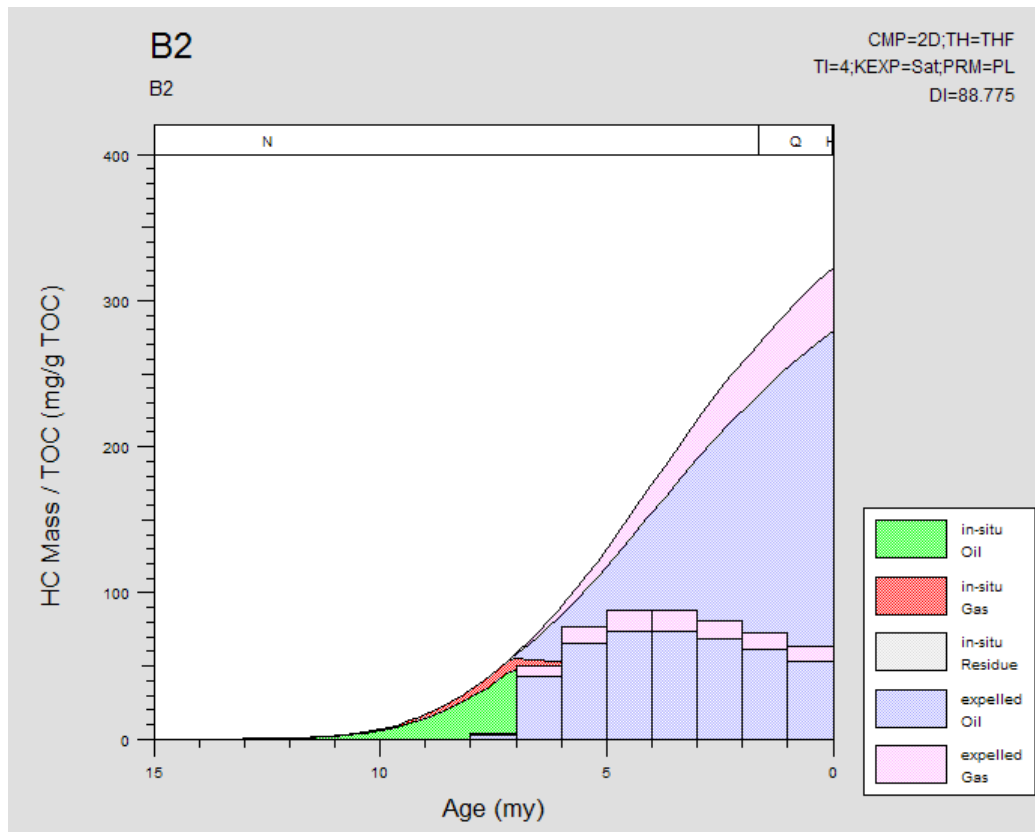
Las edades de generación y expulsión fueron determinadas, utilizando para la expulsión un límite de saturación del 20%. Trabajos previos estiman un 10% de COT original para el sur del Lago de Maracaibo (Llanos, 2000). Para la determinación de las edades de generación y expulsión, fue tomado un valor de 8% de COT original presente en la roca, el cual producto de la transformación de este en hidrocarburos, se reduce sustancialmente y actualmente se observa en valores remanentes mucho más bajos. En la Figura 20, se muestra un diagrama de generación y expulsión de hidrocarburos correspondiente al pozo más profundo, siendo la etapa de mayor generación de hidrocarburos a principios del Terciario. Cuando es alcanzado un nivel de saturación del 20%, comienza el proceso de expulsión, alcanzando un máximo valor a los 15 M.a. El punto ficticio “Foredeep” presenta mayores profundidades de soterramiento para la roca madre y por lo tanto mayores valores de madurez, siendo estas profundidades alcanzadas debido a la subsidencia alta enfrente a Los Andes, y causada por el levantamiento de la cordillera .



**Figura 20:** Generación y expulsión.

Es importante considerar que durante toda la transformación de querógeno a hidrocarburos están siendo generados tanto hidrocarburos líquidos como gaseosos, por esto la etapa de principal generación de hidrocarburos gaseosos realmente corresponde al fin de la generación de hidrocarburos líquidos y la expulsión puede variar para distintos tipos de roca generadora e incluso para un mismo tipo de roca madre con distintos contenidos de COT.

Los pozos ubicados al norte de la cuenca presentan un nivel mucho más bajo de madurez, comparado con pozos que presentan mayores profundidades. En la figura 21, se muestra el diagrama de generación y expulsión de hidrocarburos correspondiente al pozo B2, el cual indica que la cantidad de hidrocarburos generados es mucho menor, ubicándose de 7 a 10 M.a como la etapa de mayor generación de hidrocarburos. Con respecto a los hidrocarburos expulsados, estos no han alcanzado un máximo valor.



**Figura 21:** Generación y expulsión. Pozo

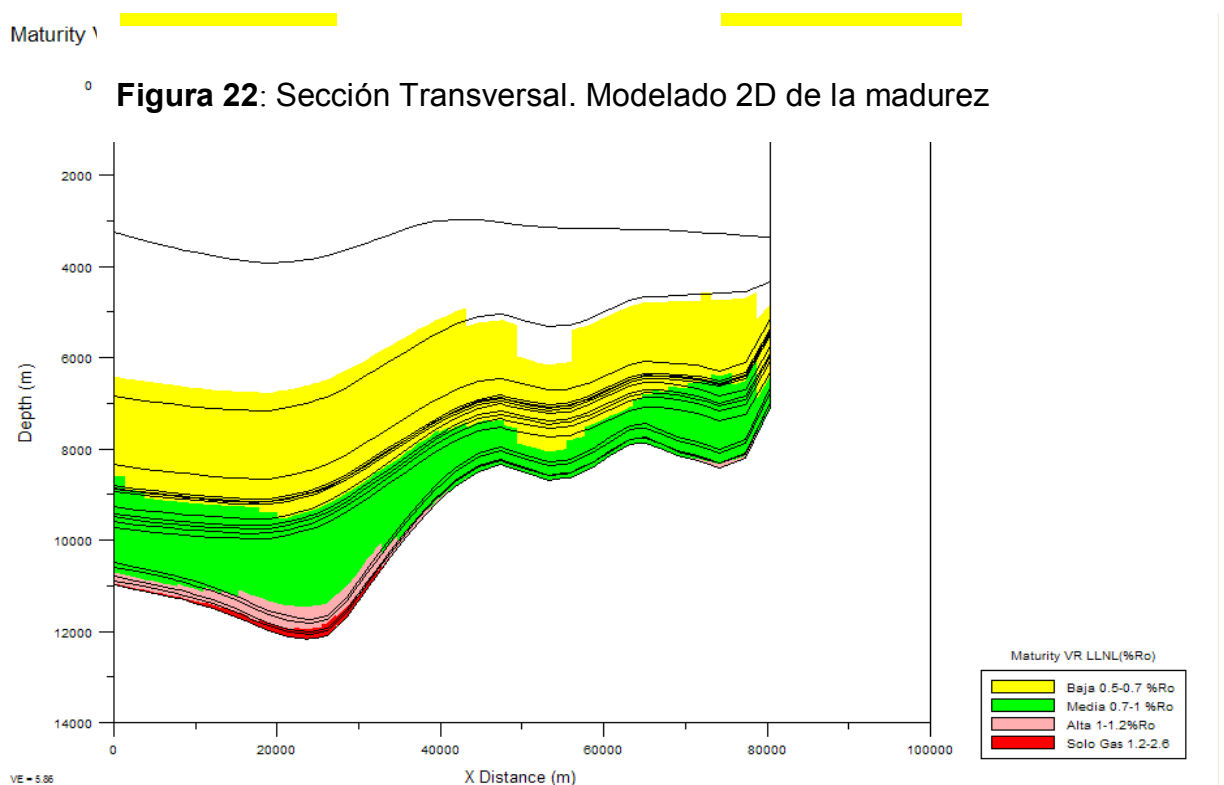
## Modelado 2D de la madurez en la actualidad

Uno de los factores más importantes para la obtención de las medidas de madurez es el flujo de calor. Dentro de las consideraciones tomadas para la realización del modelado fue estimado un flujo de calor constante para el sur del Lago Lago 30  $\text{mW/m}^2$ , basado en la dispersión que se obtuvo en las calibraciones realizadas, las cuales vienen soportadas por los valores de vitrinita medidos. Este flujo de calor bajo soporta temperaturas muy bajas inferidas para esta área de la cuenca de Maracaibo, por consiguiente los gradientes termale son muy bajos.

A nivel mundial algunas cuencas presentan éstos valores de flujo de calor, tal es el caso de la Cuenca de Transilvania en Rumania, la cual se estima que tenga un flujo de calor de 38  $\text{mW/m}^2$ , relativamente bajo con respecto a las áreas circundantes (Cranganu and Deming, 1996). En la Cuenca Cooper

ubicada en Australia, se observan valores de flujo de calor que están alrededor de los 25 mW/m<sup>2</sup> (Beardsmore, 2004). En las afueras de Dinaride en Yugoslavia, se observan valores extremadamente bajos, < 30 mW/m<sup>2</sup> debido al fenómeno de la convección intensiva en las rocas kársticas de las montañas.

La sección transversal (Figura 22) muestra la tendencia de los valores de madurez desde el sureste hacia el noroeste, donde a partir de los 5000m – 8500m, La Luna presenta valores de 0.5%-0.7% de vitrinita, y corresponden a valores bajos de madurez. A medida que aumenta la profundidad 9000m – 10900m aumenta la madurez alcanzando valores de 0.7% - 1% de vitrinita, teniendo así una madurez media. A los 11000 m de profundidad La Luna presenta los valores más altos de madurez 1% - 2% de vitrinita. Después de los 11000m principalmente hay presencia de gas. Es importante destacar que con el modelado 2D, se obtiene un mayor detalle con respecto a los resultados obtenidos.

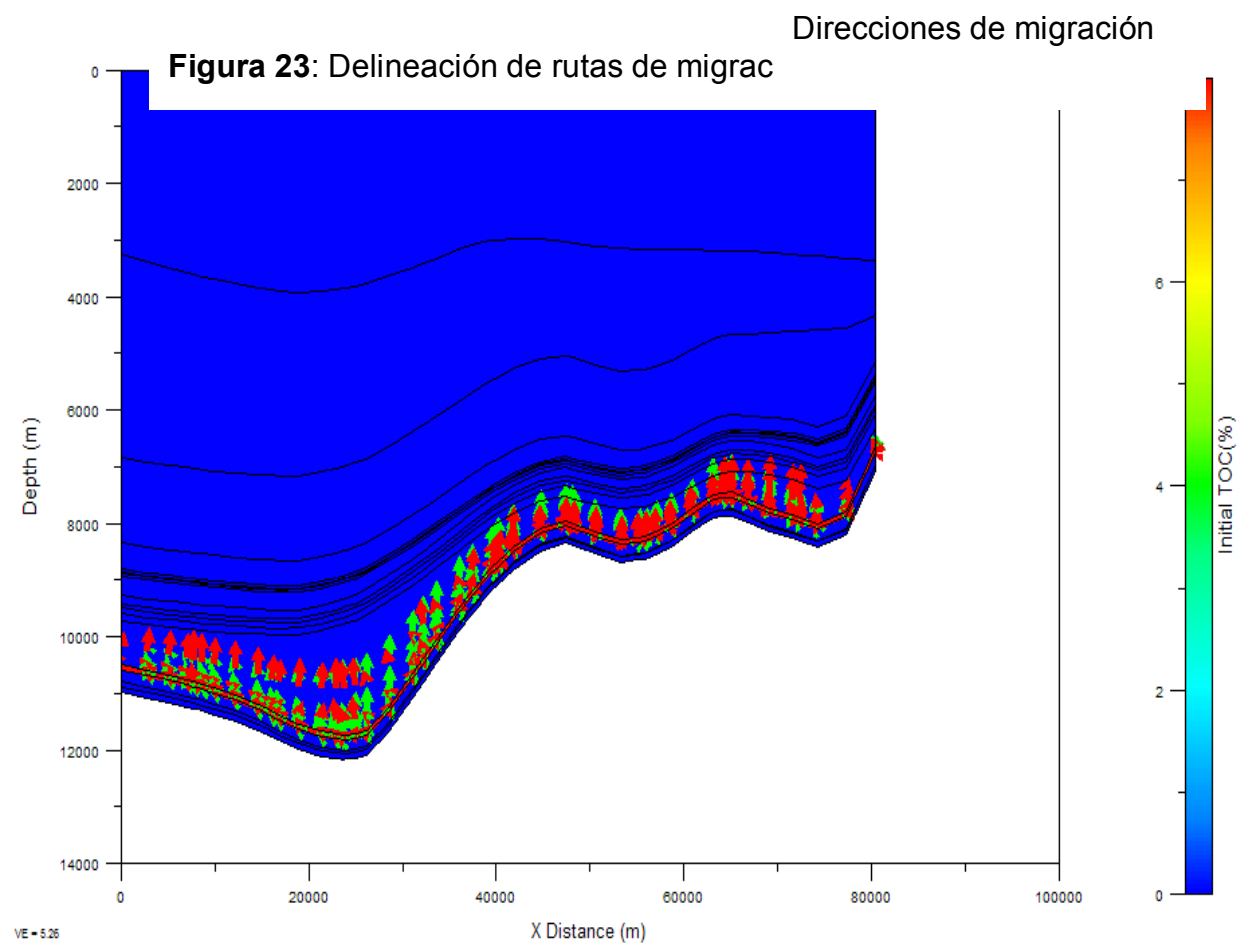


**Modelado de la migración 2D**

Tomando en cuenta los diferentes factores que pueden afectar la migración como lo son: permeabilidad, tamaño de grano, cantidad de agua que contenga la roca, volumen molar, presión de las rocas adyacentes, la figura 23 muestra una tendencia general adoptada por los hidrocarburos a partir de los 8500m – 10000m. Las flechas verdes indican la tendencia que presentan los hidrocarburos líquidos, mientras que las flechas rojas indican la de los hidrocarburos gaseosos.

A mayores profundidades hay mayor cantidad de hidrocarburos por lo tanto se puede ver a detalle que los hidrocarburos tienden a ascender, desde la roca madre hacia los sitios donde haya una menor presión, ya bien sea por microfracturas, teniendo en cuenta que la litología que constituye la Formación La Luna es principalmente carbonatos, los cuales tienen tendencia a fracturarse.

El proceso de formación de fracturas es más eficiente a medida que aumenta la madurez ya que hay mayor generación de hidrocarburos gaseosos.



El modelado 2-D realizado no considera fallas en el sistema, información que no estaba disponible. Las fallas tienen un papel muy importante en la migración, el cual es el mecanismo de conexión más importante entre la roca madre y las formaciones terciarias. De otra forma no es posible una migración secundaria eficiente a través del sello regional representado por la formación Colon.

## Conclusiones

- El flujo de calor considerado producto de la calibración para el sur de la Cuenca de Maracaibo es de 30 mW/m<sup>2</sup>, por lo tanto los valores de madurez obtenidos presentan una baja madurez relativa. Los datos

de vitrinita en los que se basa esta calibración son escasos y se desconocen detalles sobre su calidad.

## **Madurez**

- A medida que aumenta la profundidad 9000m – 10900m aumenta la madurez alcanzando valores de 0.7% - 1% de vitrinita, que se considera una madurez media a alta. A los 11000 m de profundidad La Luna presenta los valores más altos de madurez 1% - 2% de vitrinita. La subsidencia y consecuentemente la madurez, esta siendo controlada directamente por el levantamiento de los Andes.

## **Generación y expulsión de hidrocarburos**

- De acuerdo a los datos de los pozos ubicados al norte del área, presentan un nivel mucho más bajo de madurez, comparado con pozos que presentan mayores profundidades ubicados al sur.
- Los pozos pocos profundos, según lo diagramas de soterramiento indican que la cantidad de hidrocarburos generados es mucho menor, siendo de 7 a 10 M.a la etapa de mayor generación de hidrocarburos.
- Durante el período del Mio-plioceno se ubica la etapa de mayor generación de hidrocarburos. Cuando es alcanzado un nivel de saturación del 20%, comienza el proceso de expulsión alcanzandose un máximo valor entre los 15 M.a y la actualidad.

## **Migración**

- La migración esta controlada principalmente por el mecanismo de flotabilidad y efectos de capilaridad. Por ejemplo, a una profundidad de

8500m – 12000m, los hidrocarburos presentan la tendencia de ascender principalmente de forma vertical en los sitios que han alcanzado una alta madurez, donde es propiciada la migración secundaria de hidrocarburos líquidos y gaseosos. No se realizó ninguna simulación de la migración a través de fallas.

## Recomendaciones

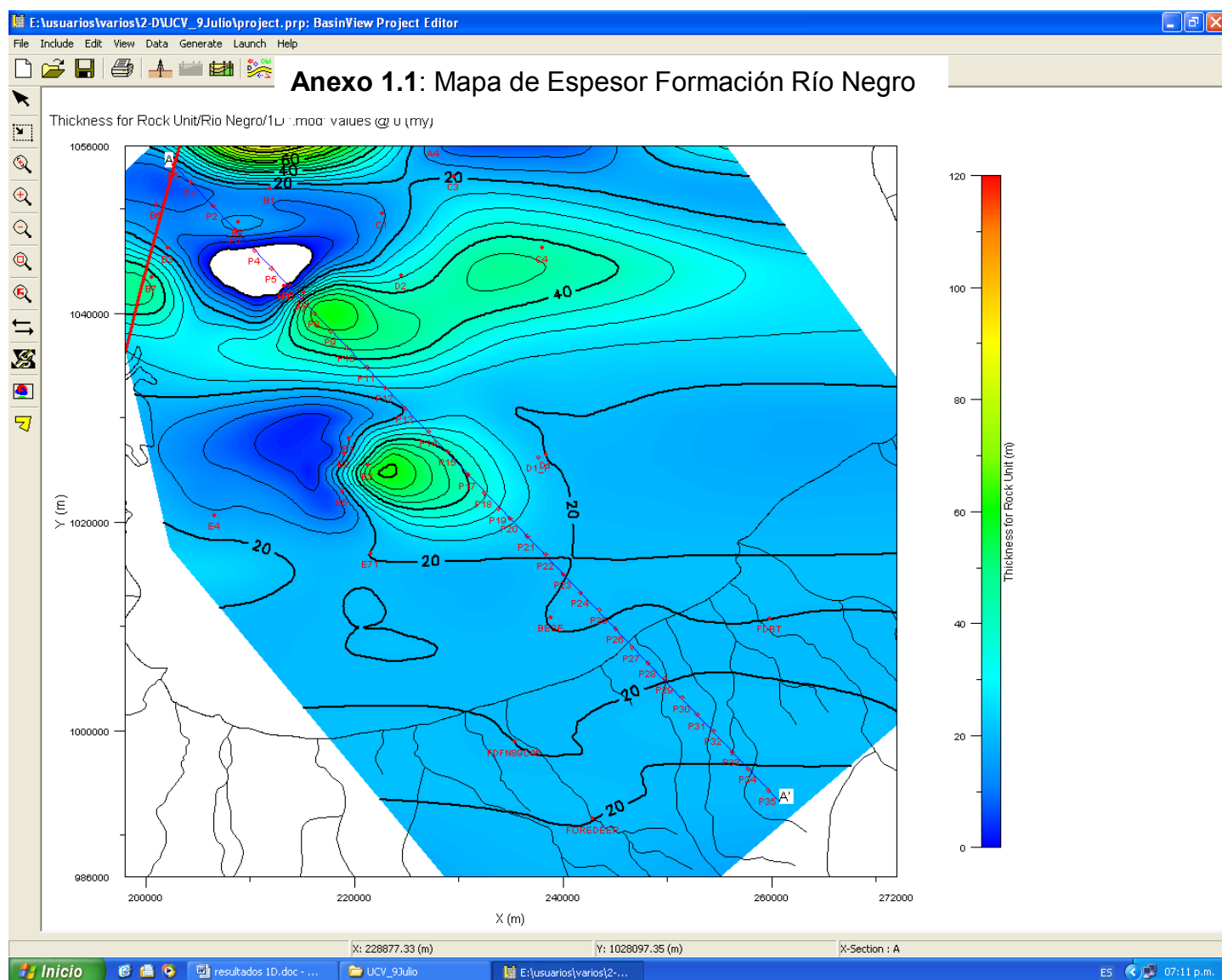
- Realizar nuevas calibraciones del modelo de compactación con datos de porosidad, ya que para la realización de este trabajo no eran conocidos estos datos en los pozos disponibles.
- Obtener nueva información de madurez en base al análisis de muestras en toda la columna geológica. Se recomienda tanto reflectancia de vitrinita como análisis de pirolisis rock-eval.
- Integrar información de madurez de crudos y extractos, principalmente obtenida de biomarcadores de modo de calibrar los resultados del modelo y asociarlo a sus resultados.
- Modelar pozos ficticios adicionales, en las áreas extensas donde hay información escasa e integrar la interpretación sísmica al modelado.
- Realizar un nuevo modelado 2D, a medida que se tenga nueva información y que incluya fallas en el sistema de migración.

## Anexos

Tomando en cuenta la información presente en cada uno de los pozos, a continuación es presentada cada uno de los mapas de espesores, y litológicos, como resultado de la integración en BasinView. La nomenclatura utilizada para distinguir las distintas unidades litológicas corresponde: **A** (arenisca), **Ltt** (lutita), **Lm** (limolita), **C** (caliza), **Cr** (carbón) y **D** (dolomita).

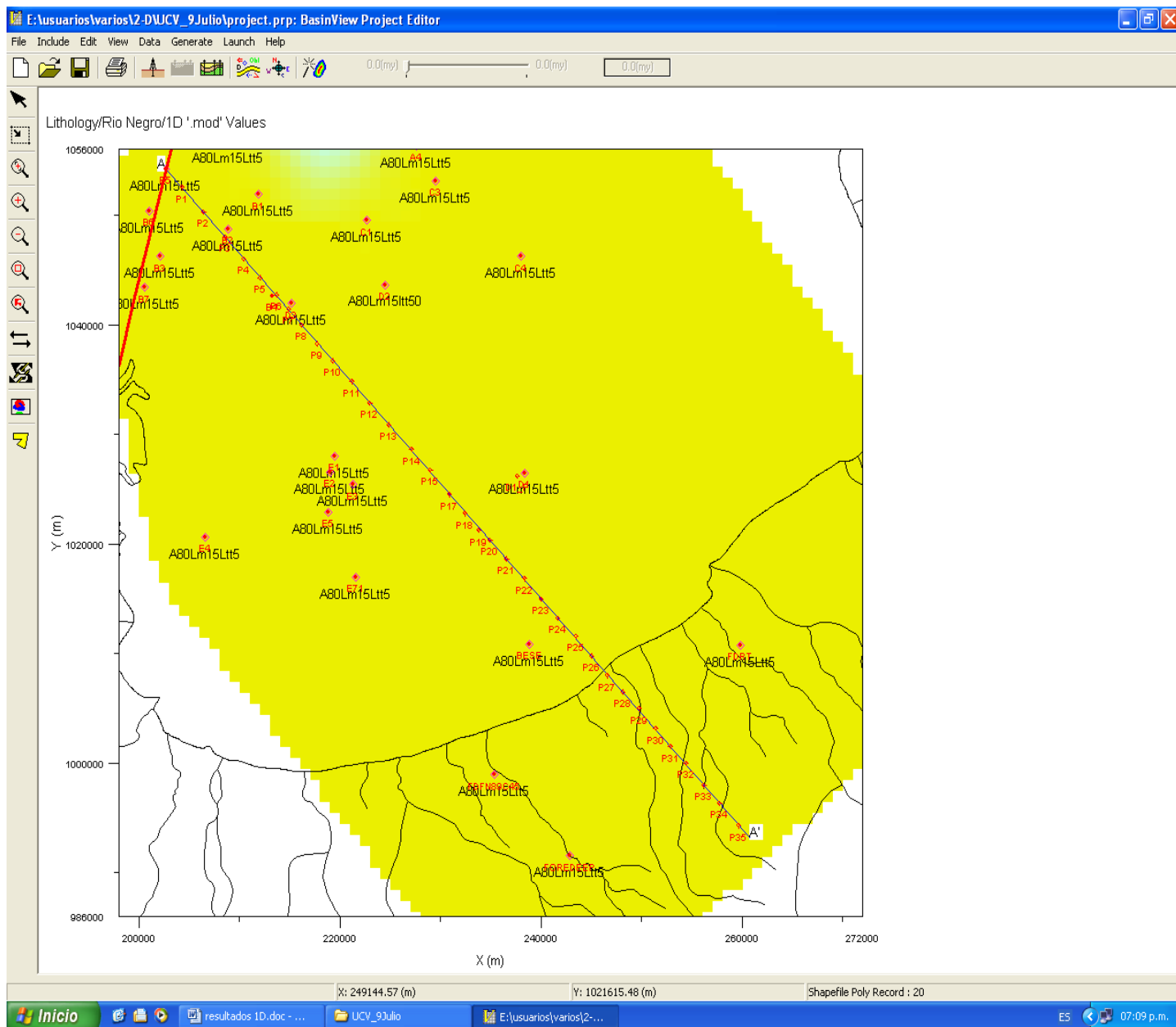
### **Río Negro 130 Ma.**

Al inicio del Cretácico fue propiciado el desarrollo de un sistema fluvial, donde los sedimentos principalmente son de carácter continental, siendo representados por la Formación Río Negro, estos presentan la tendencia de alcanzar grandes espesores hacia el norte de la cuenca, mientras que al sur disminuyen (Mann et al, 2006). La Figura 19 muestra la tendencia de espesores que hacia el sur de la cuenca poseen valores entre 20 y 40m, de acuerdo a la información de los pozos. La Formación Río Negro, para el sur de la Cuenca de Maracaibo puede alcanzar 20m de espesor según (González de Juana et al, 1980).



En los datos de origen (Ver Figura 20), se refleja una predominancia de altos valores en el porcentaje de areniscas, las cuales alcanzan un 80%, con limolitas presentan un 15% y las lutitas un 5%.

El ambiente de sedimentación correspondiente a la Formación Río Negro coincide en un ambiente deltaico, donde grandes secuencia de areniscas conglomeráticas indican una pequeña pulsación del ciclo fluvial, con disminución de energía mecánica (Schlumberger, 1997).



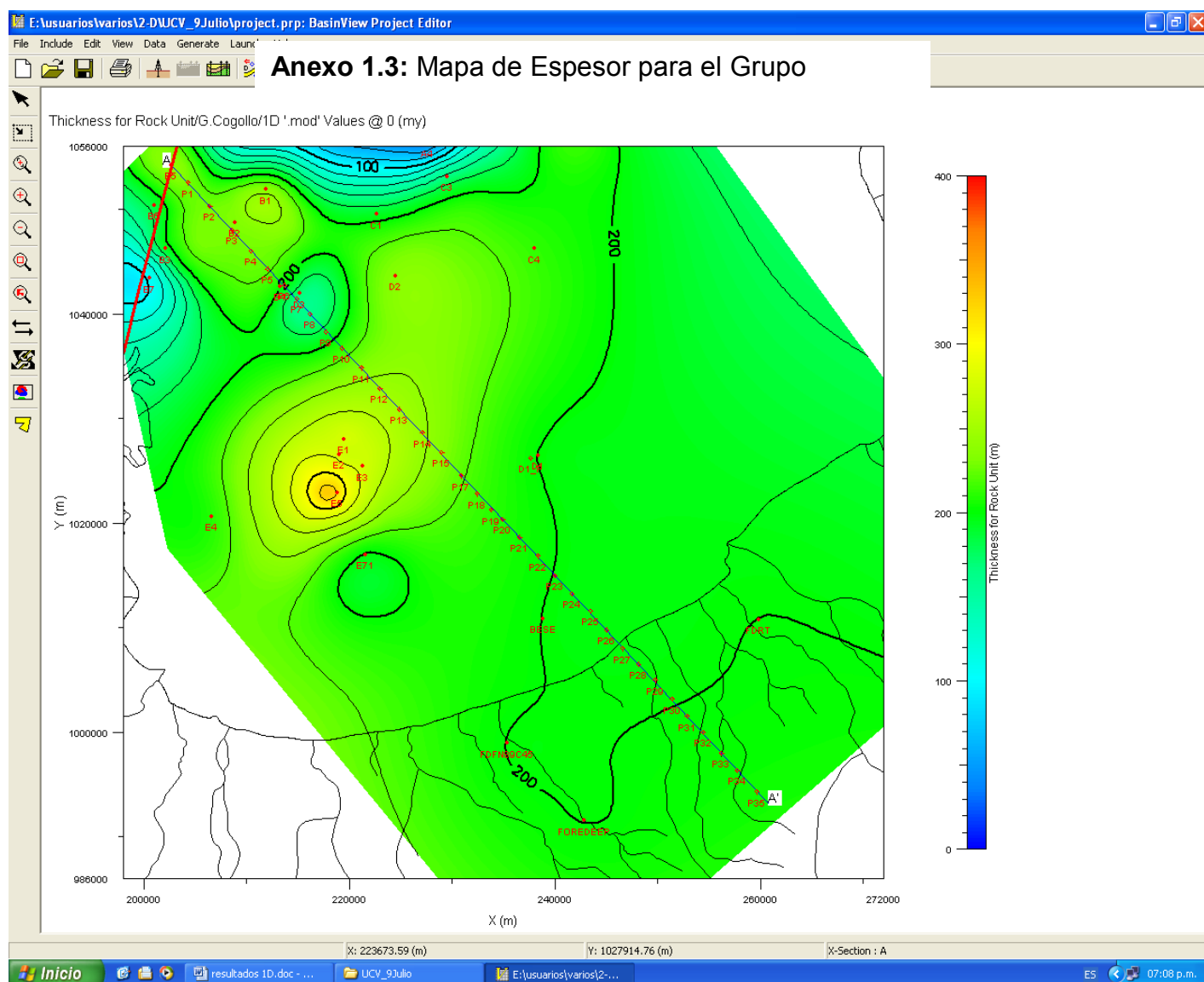
80% Areniscas

## Anexo 1.2: Mapa Litológico Formación Río Negro

### Grupo Cogollo 112-125 Ma.

La Figura 21, fue muestra una tendencia de espesores alrededor de 200m promedio para sur de la Cuenca de Maracaibo. La mayoría de los espesores reportados en los pozos del estudio de Llanos, 2000 están alrededor de 200m.

Basado en publicaciones previas de trabajos realizados en la Cuenca de Maracaibo, donde utilizan registros sísmicos, éstos han reportado datos que muestran espesores de 300m de la plataforma carbonática que se encuentra debajo de la Cuenca de Maracaibo, al oeste de Venezuela (Castillo et al, 2006). Las variaciones de espesor que presenta el Grupo Cogollo a lo largo de la región pueden ser atribuidas al arqueamiento de la corteza continental a comienzos del Cretácico, así como también al levantamiento de las montañas proto-Andinas (Salvador, 1986).

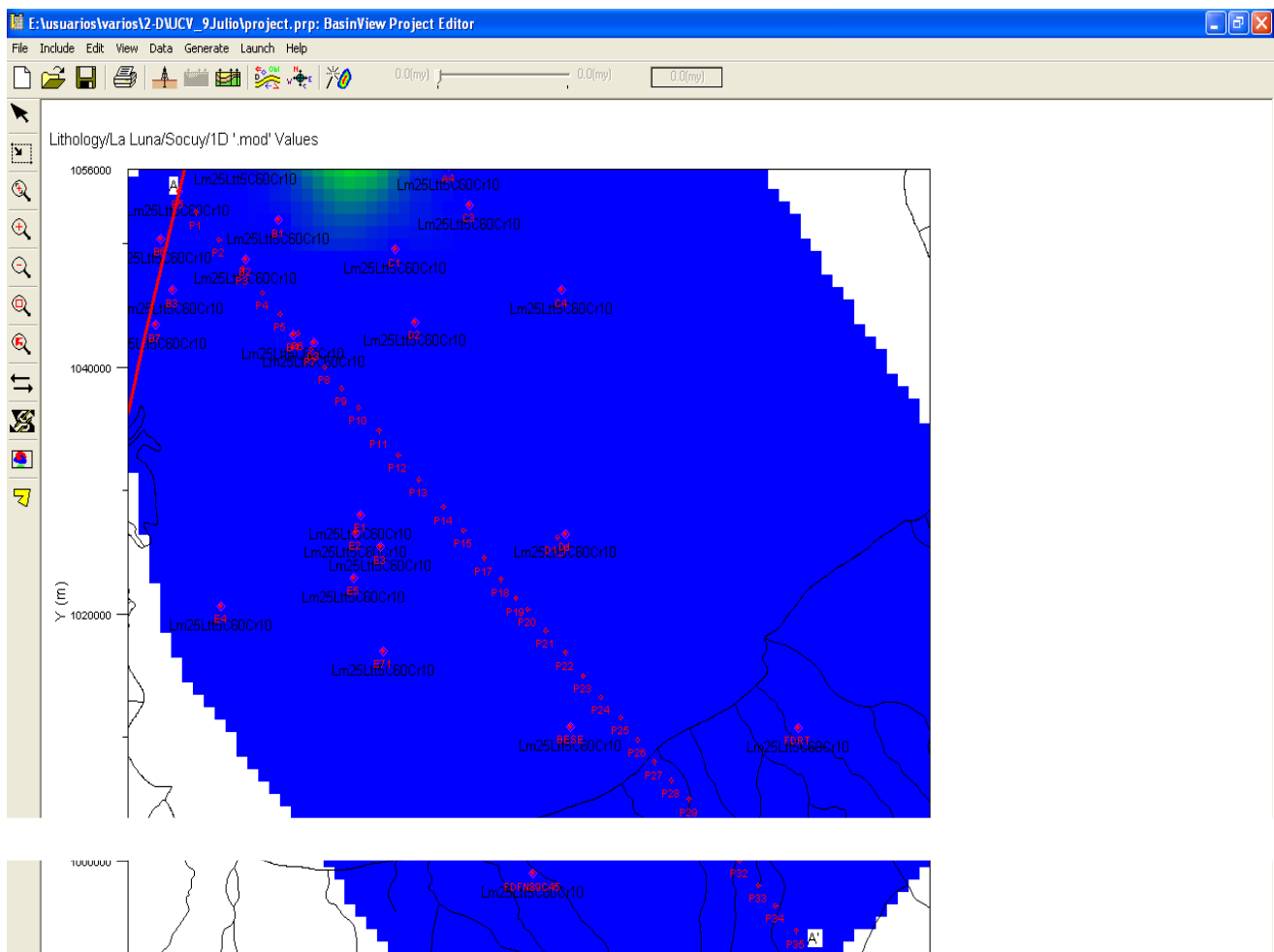


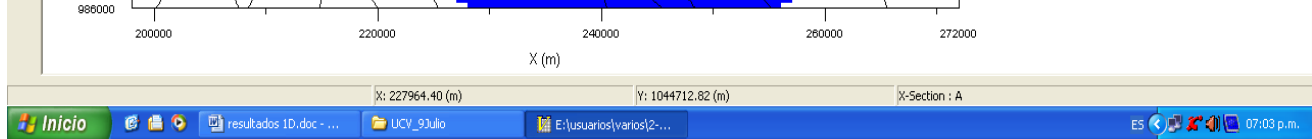
El Grupo Cogollo está caracterizado por contener facies sedimentarias transgresivas, ricas en carbonatos, y depositados en un ambiente de plataforma someras durante un periodo de tectónica estable. Estas depositaciones generalmente ocurren en aguas someras, de poca profundidad (Schlumberger, 2007). En la Figura 22 es mostrada la sedimentación de una mezcla de carbonatos-clásticos donde existe la predominancia de 60% correspondiente a una litología dolomítica, y un bajo porcentaje de areniscas, lutitas y limolitas, 10%, 10% y 20%, respectivamente. Los datos provienen de la información suministrada en los pozos y puntos ficticios.



Actualmente están siendo realizados estudios en el sur de la cuenca, por lo tanto en la actualidad 97m, de la formación han sido medidos. (Méndez, 2008 comunicación personal). Basado en la conclusión anterior es considerado un espesor de 100m para el sur de la cuenca.

La sedimentación de la formación ocurrió durante el evento tectónico del margen pasivo, favoreciendo así la sedimentación de distintas facies sedimentarias (Mann et al, 2006). Basado en la información de pozos en la Figura 23 se muestra la tendencia general de los datos correspondientes a lutitas calcáreas de 5%, limolitas 25%, calizas 60% y carbón 10%.



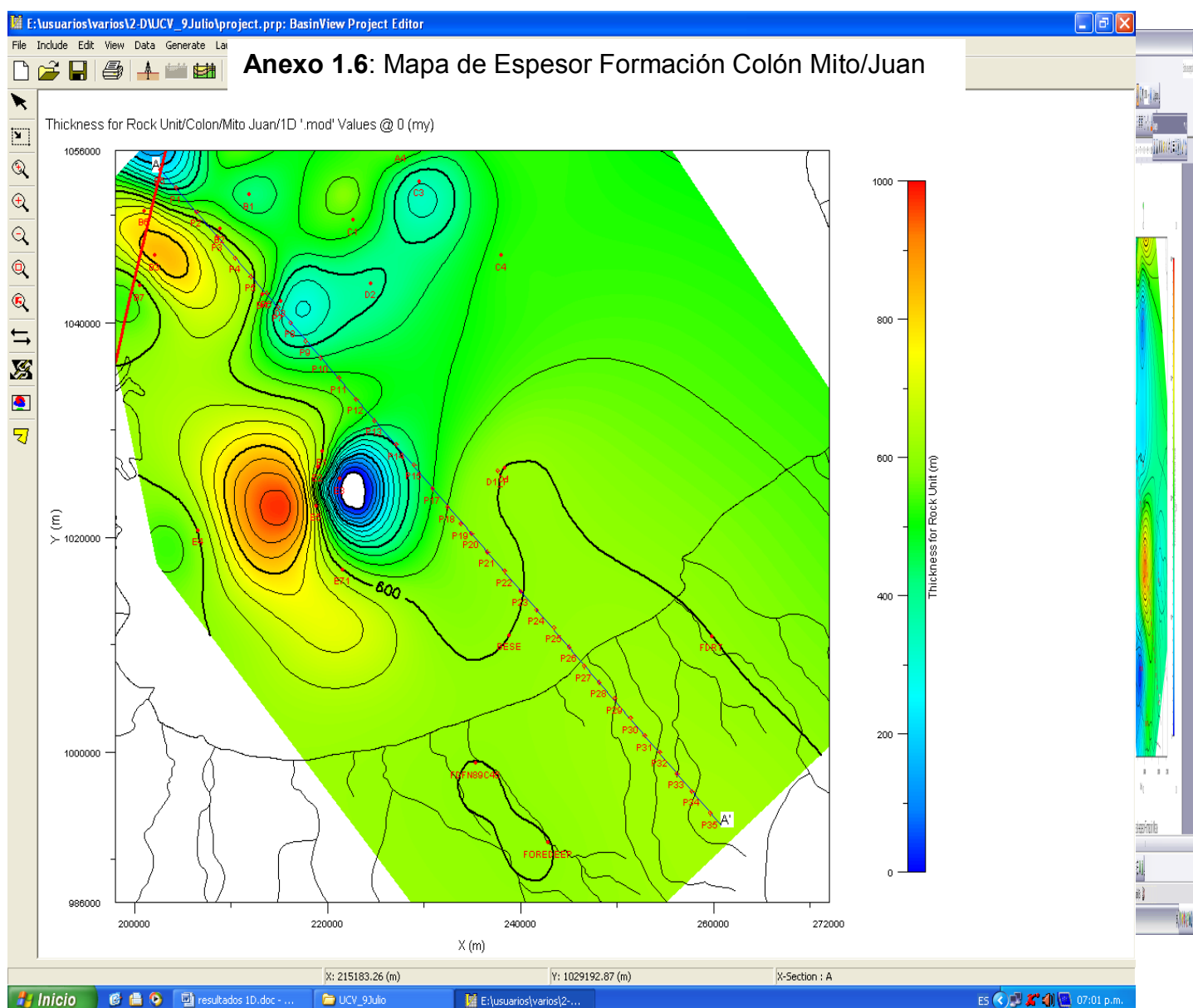


◀50% Caliza

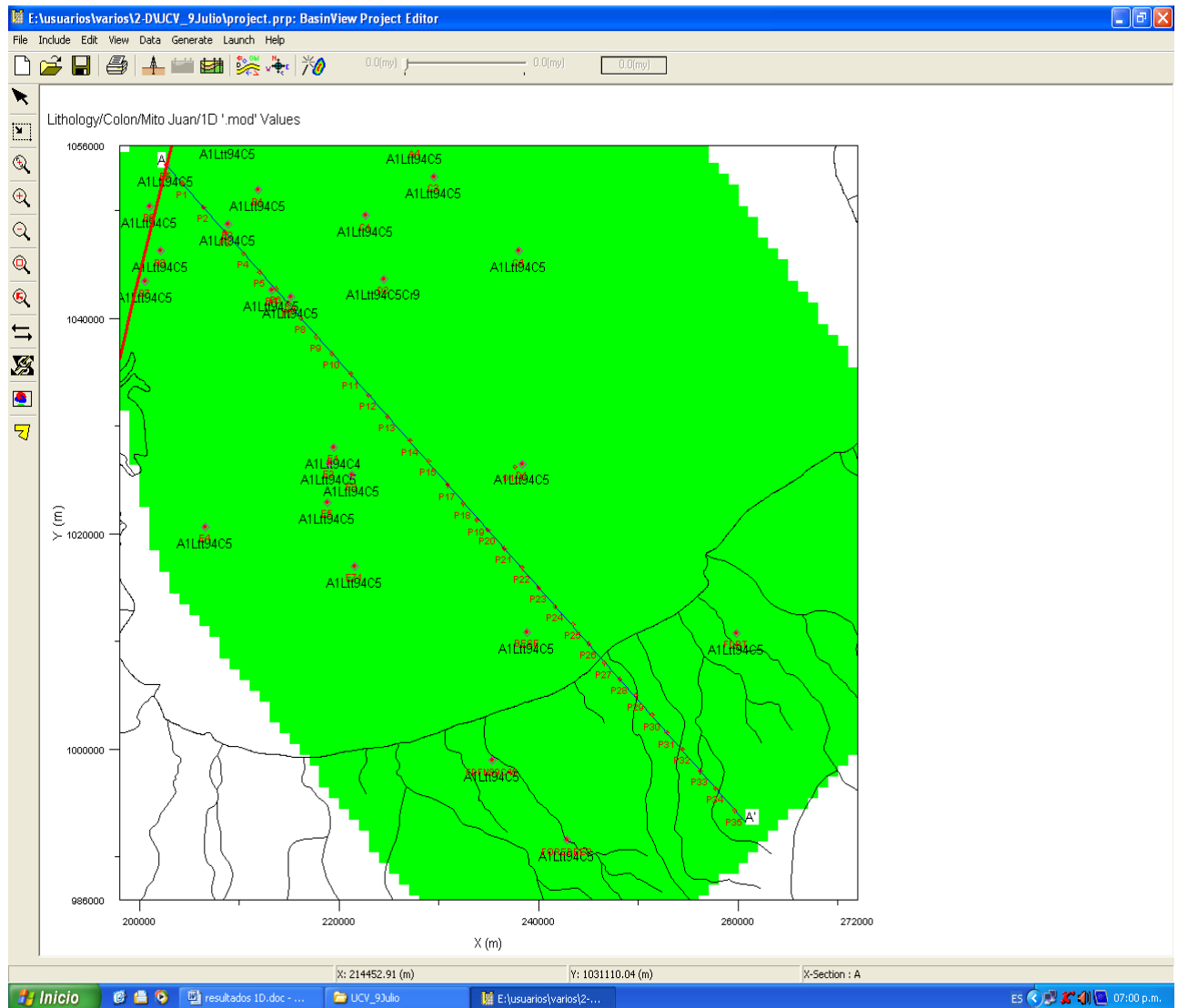
### **Anexo 1.5: Mapa Litológico de la Formación La Luna**

#### **Colón/Mito Juan 70,6 Ma.**

La Figura 24 con base a los datos de pozo, muestra un espesor constante de 600m hacia el sureste. Hacia el noroeste hay una predominancia de espesores que alcanzan valores ubicados en el rango de los 800 y 1000m.



La Formación Colón/Mito Juan posee una mayor contribución de clásticos derivados del continente (Schlumberger, 1997). La Figura 25 muestra una tendencia a una mayor proporción en cuanto al porcentaje de lutitas con una predominancia del 94%, de acuerdo a los datos de pozos, hay presencia de menores cantidades de areniscas.

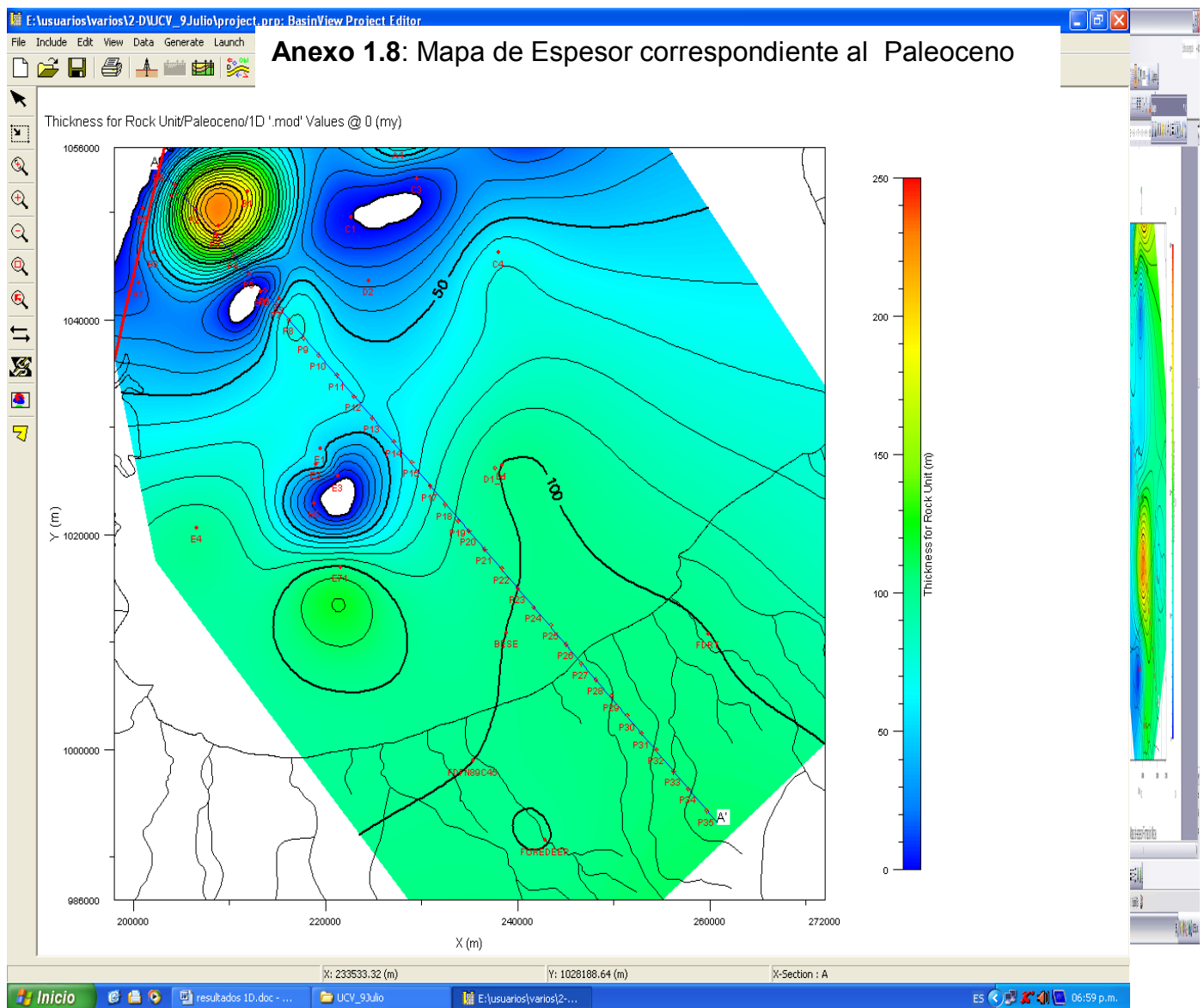


<70% Lutita

**Anexo 1.7: Mapa Litológico Formación Colón/Mito**

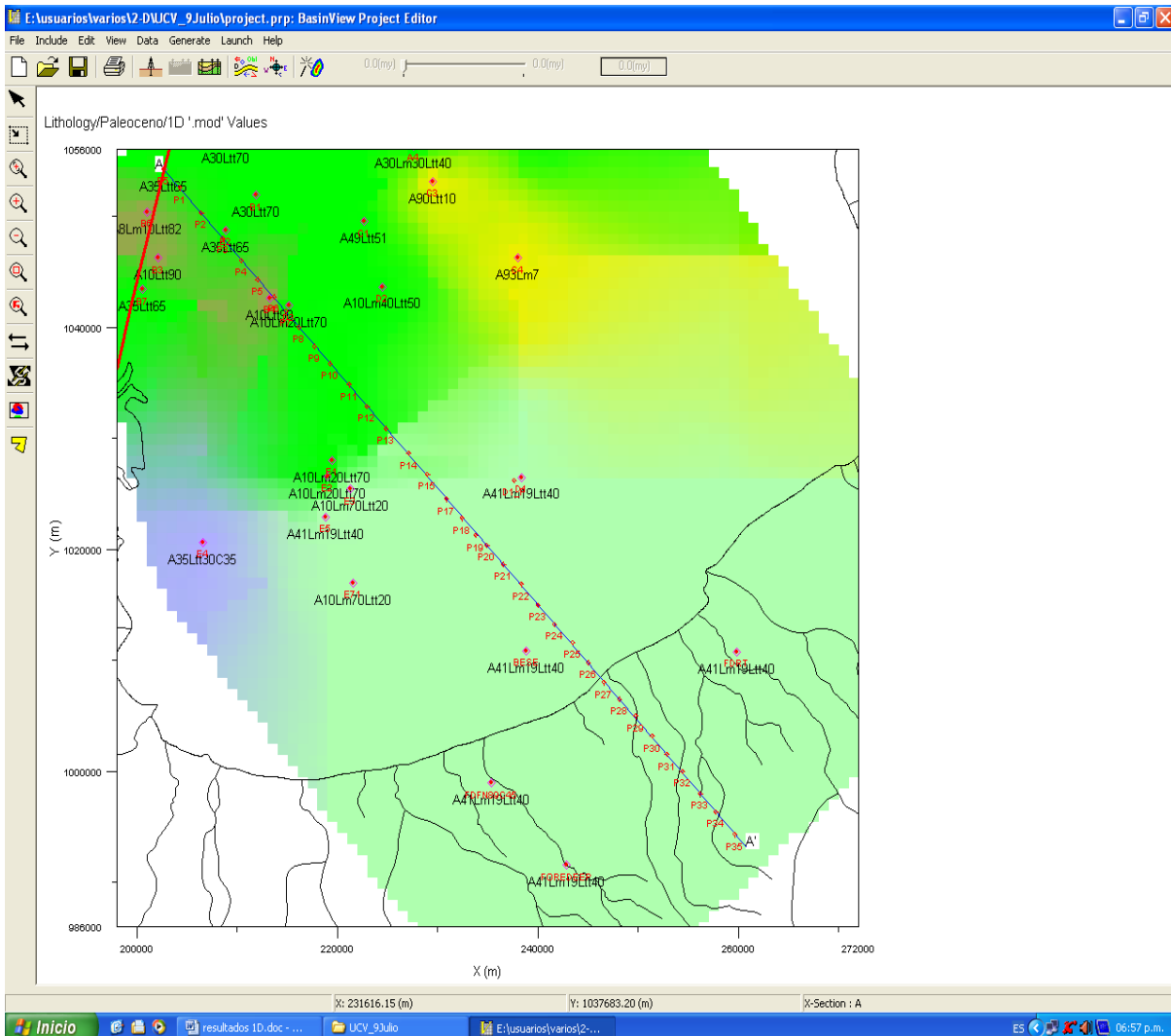
### **Paleoceno 65,5 Ma.**

La Figura 26 muestra la tendencia general a aumentar el espesor hacia el sureste, alcanzando así un valor máximo de 100 m, según la información de pozos.



La Figura 27 muestra un predominio de sedimentos principalmente clásticos, donde hacia el noreste de la cuenca hay una alta proporción en cuanto al porcentaje de lutitas, las cuales alcanzan valores de 70%, siendo combinado con un 30% de areniscas. Hay zonas ubicadas al noreste las cuales presentan un enriquecimiento relativo del porcentaje de lutitas en un 90%.

Los datos de origen reflejan un 35% de caliza hacia el sureste y hay una predominancia de 40%-20% en cuanto al porcentaje de lutitas, combinado con un 19%-70% de limolitas y de 10%-40% de areniscas. Reflejando así la mezcla



de sedimentos, característicos de un ambiente fluvio-deltaico.

<70% Lutita

<80% Lutita

<80% Areniscas

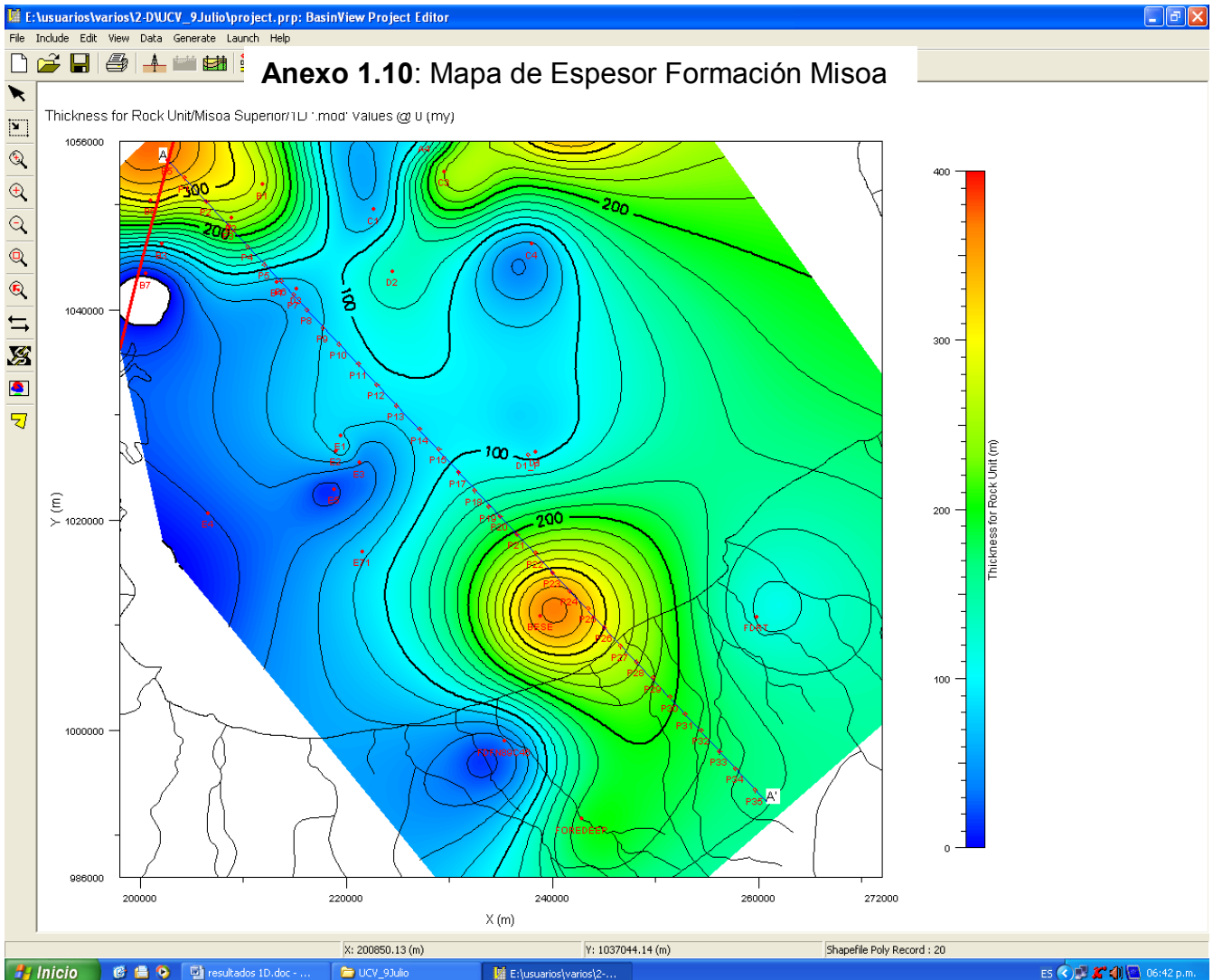
<20% Caliza

<50% Limolita

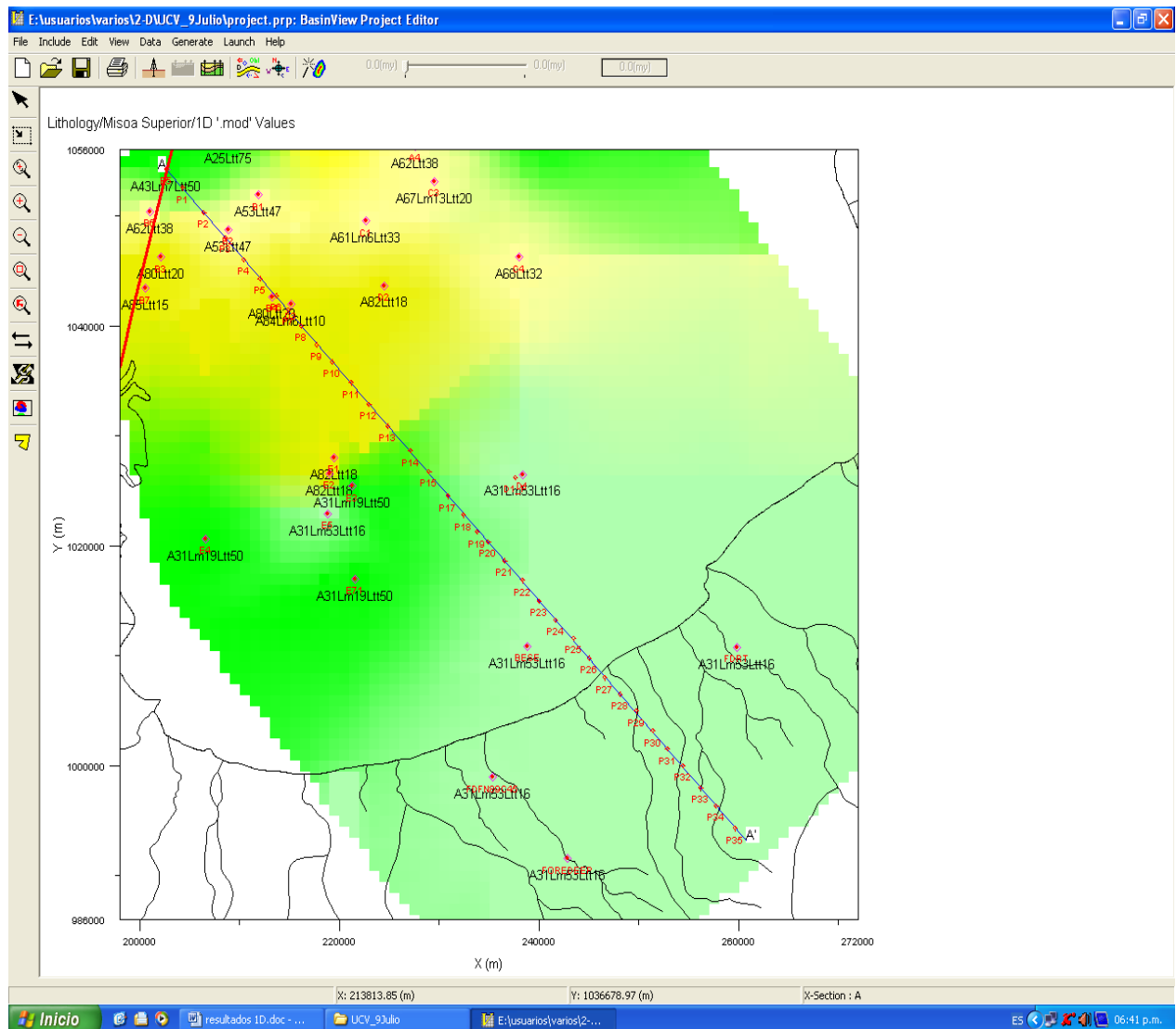
### Anexo 1.9: Mapa Litológico correspondiente al Paleoceno

**Formación Misoa 43,5 M.a**

En la figura 28 es mostrada una tendencia clara del aumento del espesor en dirección sureste, alcanzando valores de 200m.



Caracterizada principalmente por la presencia de facies correspondiente a un ambiente sedimentario fluvio-deltaico (Mann et al, 2006). La Formación Misoa presenta una mayor proporción de areniscas 30%-60%. El mayor porcentaje de arenisca 60% hacia el noroeste de la cuenca, disminuyendo el porcentaje a un 30%, hacia el sureste (Ver Figura 29). Ésta Formación representa a la roca reservorio para la mayoría de los campos petroleros existentes en la Cuenca de Maracaibo (Escalona, 2006)



50% Arenisca

<50% Limolita

<80% Areniscas

<70% Lutita

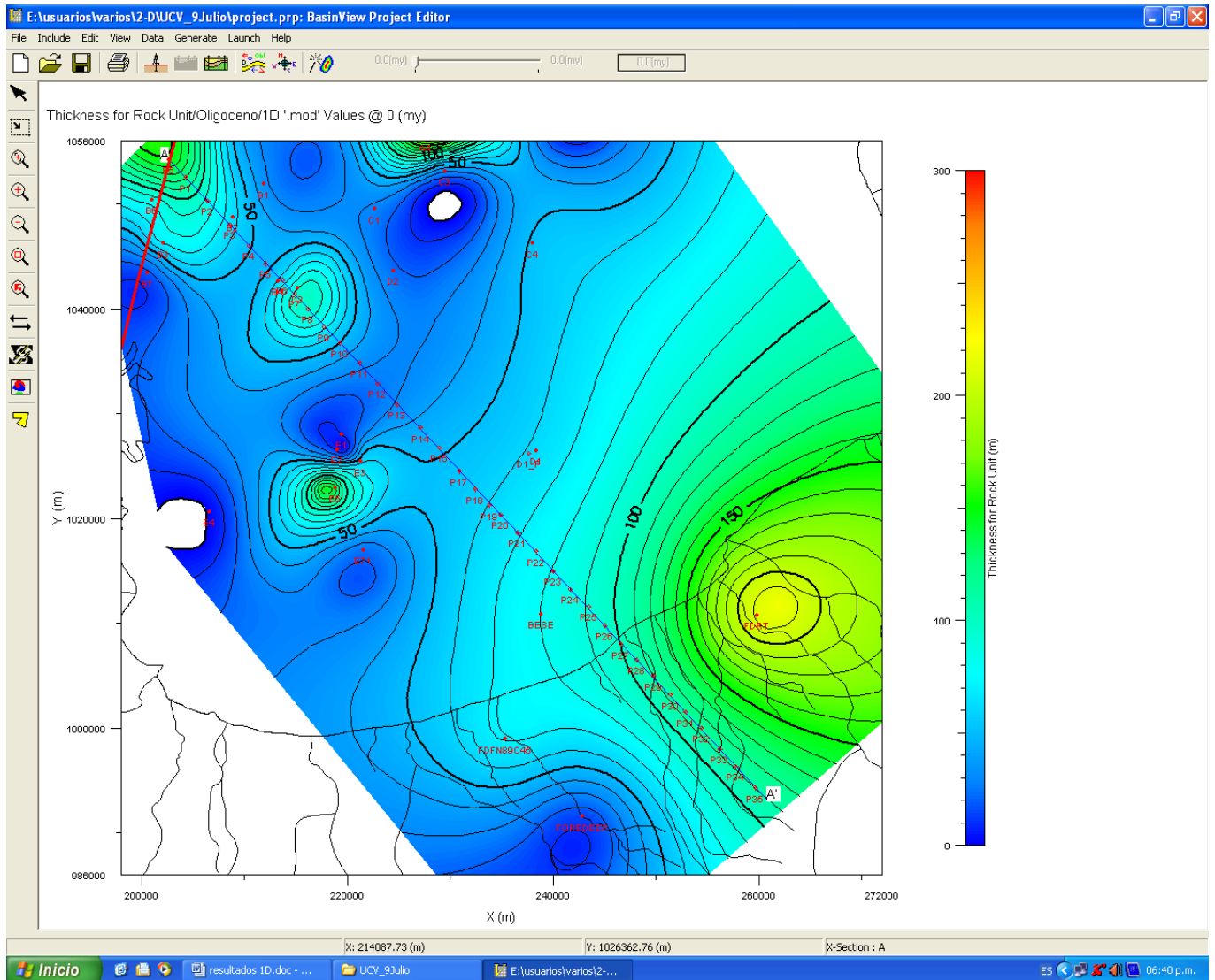
**Anexo 1.11: Mapa Litológico Formación Misso**

### Oligoceno 33,9 M.a

La Figura 30 muestra la alta diferencia de espesores presentes en pozos cercanos, donde hacia el noroeste de la cuenca se encuentra espesores con valores de 50m, aumentando hacia el sureste de la cuenca alcanzando valores de 150m.

Estos sedimentos en su mayoría han sido derivados localmente de sucesiones eocenas retrabajadas (Castillo y Mann 2006). De un ambiente marino somero

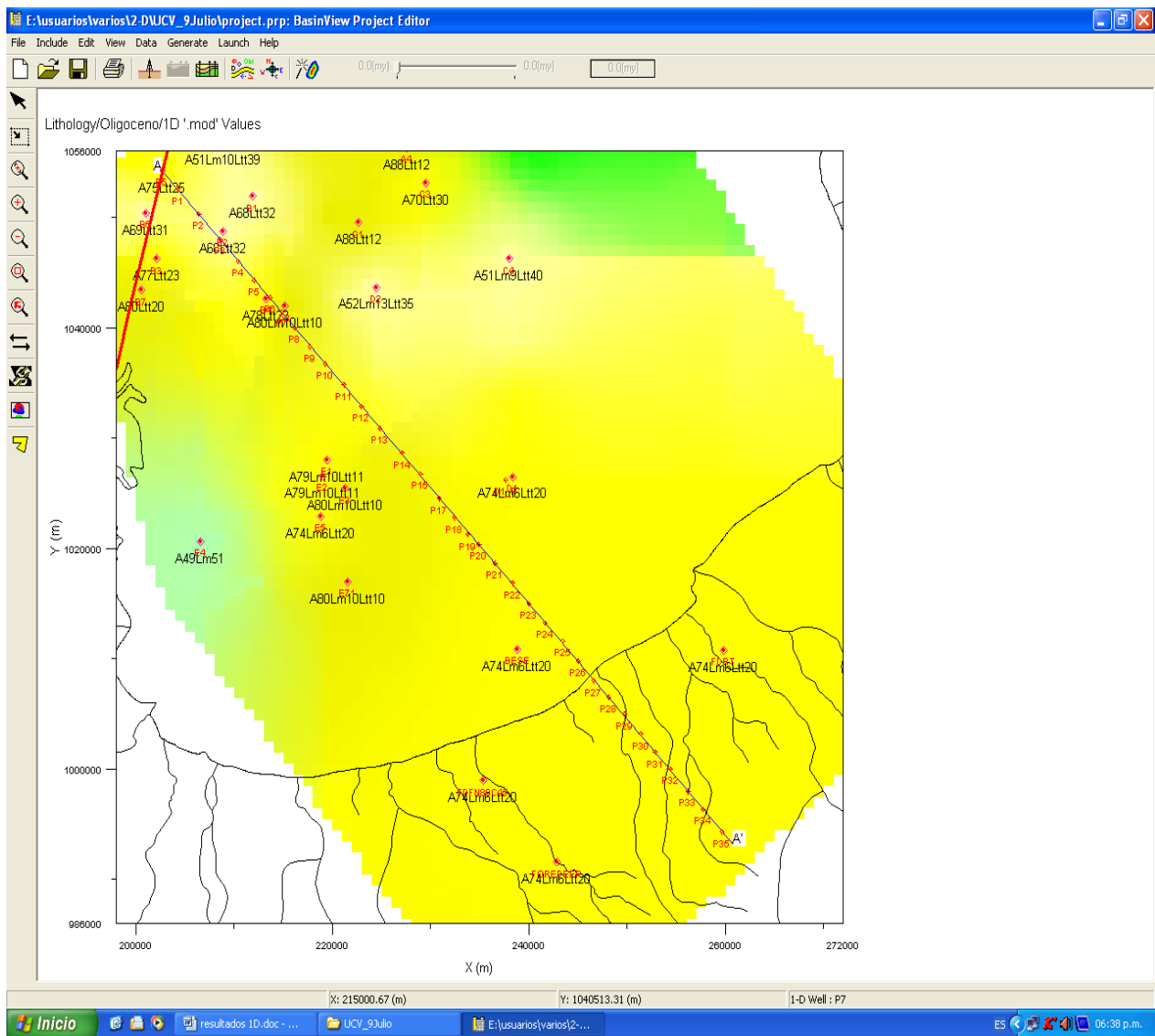
gradando hacia un ambiente continental, donde hay una mayor predominancia de clásticos, los cuales rellenan cuencas en diferentes direcciones, existiendo así una mayor tasa de depositación en las desembocaduras de los valles.



La litología predominante es del tipo areniscas, las cuales alcanzan porcentaj

#### Anexo 1.12: Mapa de Espesor correspondiente al

es hasta del 74% hacia el sureste de la cuenca (Ver figura 31). Existe un enriquecimiento relativo del porcentaje de lutitas hacia el noroeste de la cuenca, alcanzando valores de 32%, más sin embargo es predominante el porcentaje de areniscas cuyo valor más alto es de 74%. También es notable que el porcentaje de limolitas en una zona de la cuenca, presenta un porcentaje de 51%.



50% Arenisca

<50% Limolita

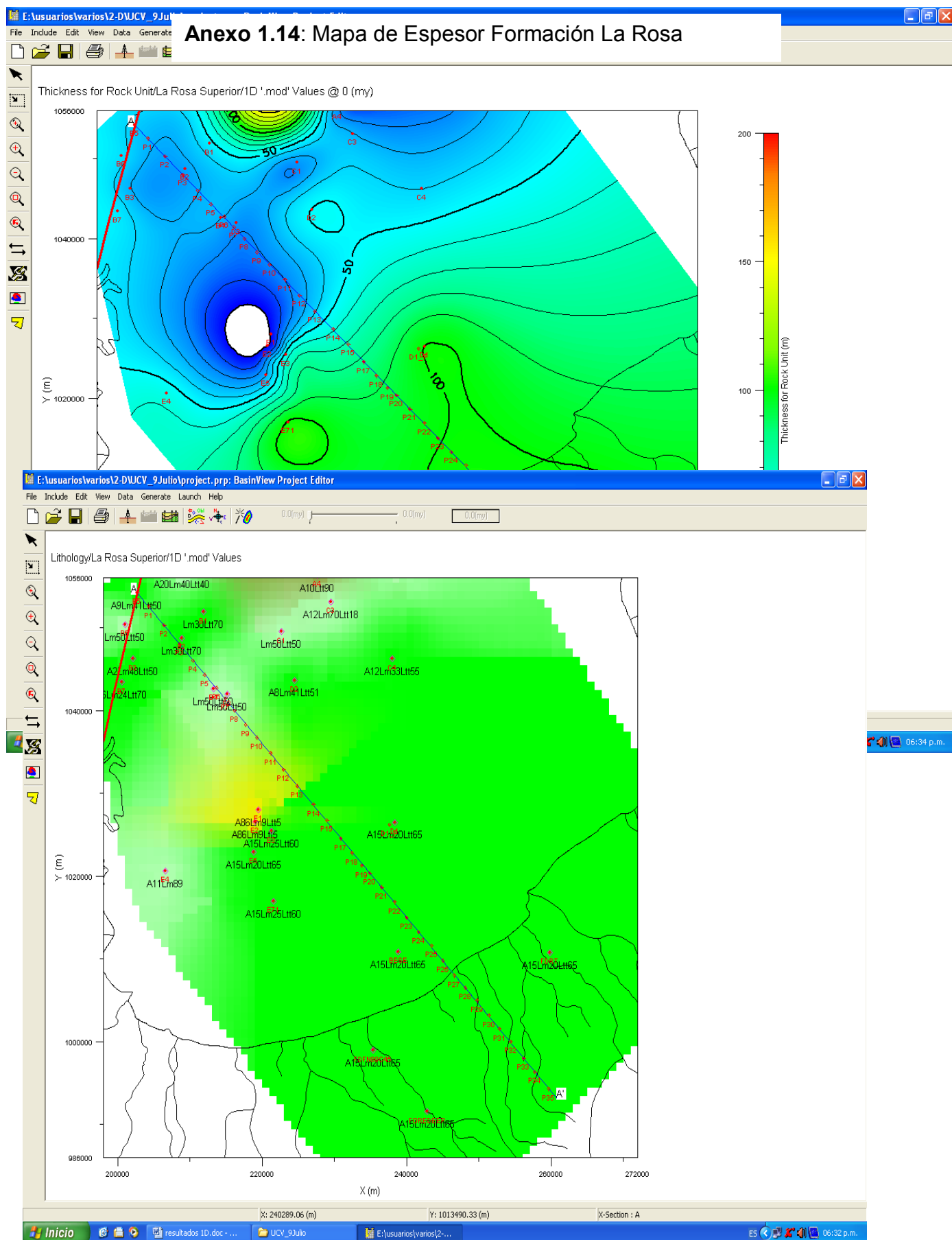
<80% Areniscas

<70% Lutita

**Anexo 1.13:** Mapa Litológico correspondiente al Oligoceno

### La Rosa 23,03 Ma.

Su espesor oscila entre unos 70 a 1100 m debido a que se depositó sobre una superficie irregular de erosión, controlada por fallas (Schlumberger, 1997). De acuerdo a la Figura 32, los espesores reflejan valores que hacia el noreste de la cuenca alcanzan valores máximos de 150m y hacia el sureste disminuye un poco el espesor hasta 100m.



muestran ésta tendencia principal donde hay una mayor predominancia de

altos porcentajes de lutitas que varían de un 50-90%, limolitas 40-89% y areniscas de un 8-20%. La Rosa por sus areniscas basales es de gran importancia petrolífera, presenta un desarrollo lutítico que la caracteriza, con variaciones laterales arenosas las cuales constituyen yacimientos de importancia en la costa oriental del Lago de Maracaibo (Schlumberger, 1997).

◁70% Lutita

◁80% Arenisca

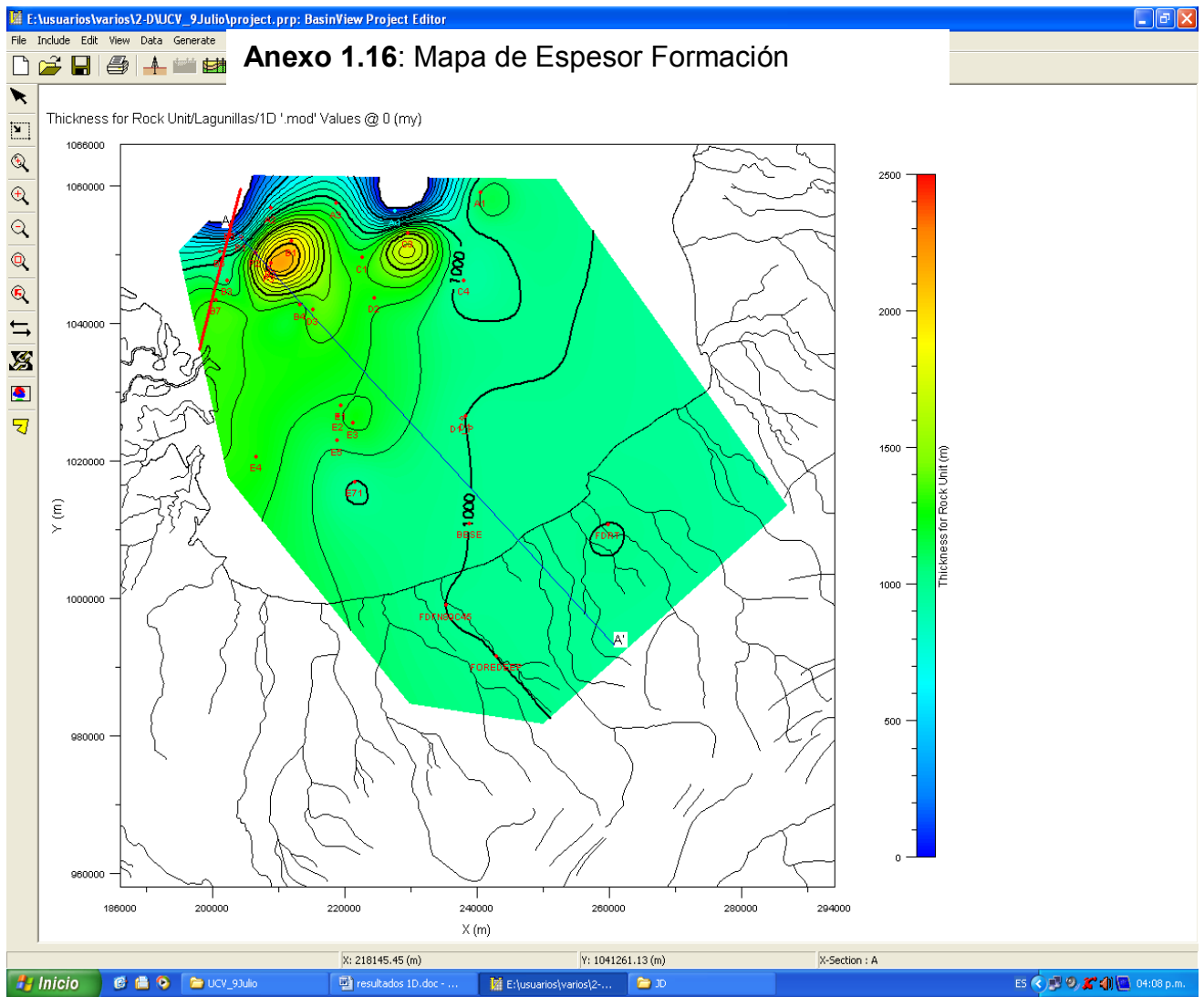
◁80% Lutita

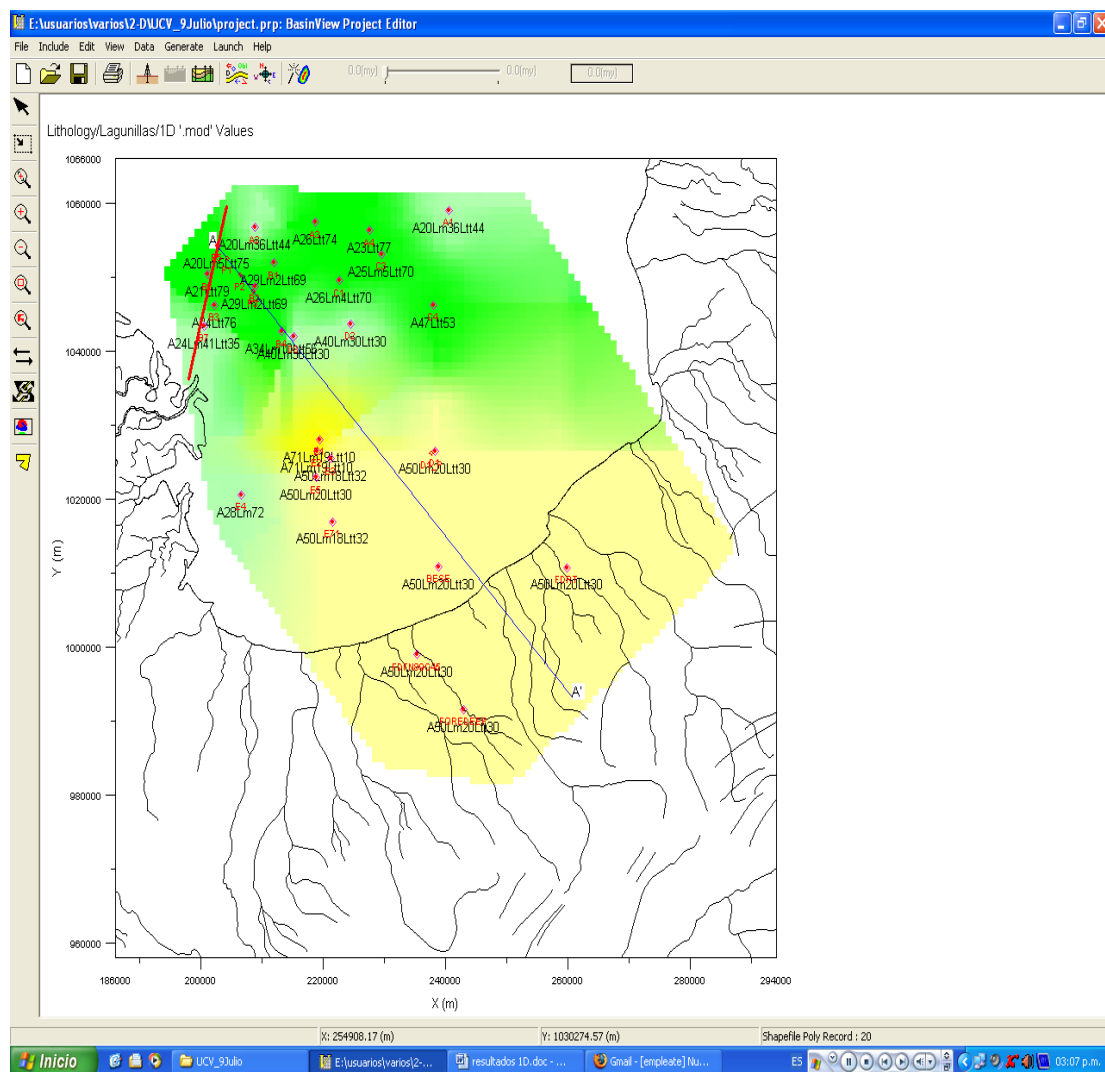
◁50% Limolita

#### **Anexo 1.15: Mapa Litológico Formación La Rosa**

##### **Lagunillas 15,97 Ma.**

La Formación Lagunillas suprayace transicionalmente a la Formación La Rosa, y está constituida por sedimentos de ambientes someros transicionales, costeros y hasta continentales, que alcanzan más de 1000m de espesor hacia el centro del Lago de Maracaibo (Mann et al, 2006). La Figura 34, muestra una tendencia similar hacia el sur de la cuenca, donde los espesores alcanzados están en el orden de los 1000m.





a presencia de altos valores en cuanto a los porcentajes de lutitas, las cuales están en un rango de 40-70%, y de limolitas hasta un 30%, mientras que hacia el sur de la cuenca es observada la tendencia al aumento del porcentaje de

areniscas, alcanzando así valores de 50%. Basado en estudios realizados en la Cuenca de Maracaibo, hay una alta proporción de depósitos marinos someros que gradan hacia un ambiente continental (Mann et al, 2006), la Figura 35 muestra esta tendencia, basado en la información de los pozos al norte de la cuenca hay un mayor porcentaje de lutitas pudiendo ser asociadas a un ambiente marino y al sur de la cuenca donde hay una mayor proporción de areniscas, siendo relacionadas a la transición hacia un ambiente mas continental.

70% Lutita

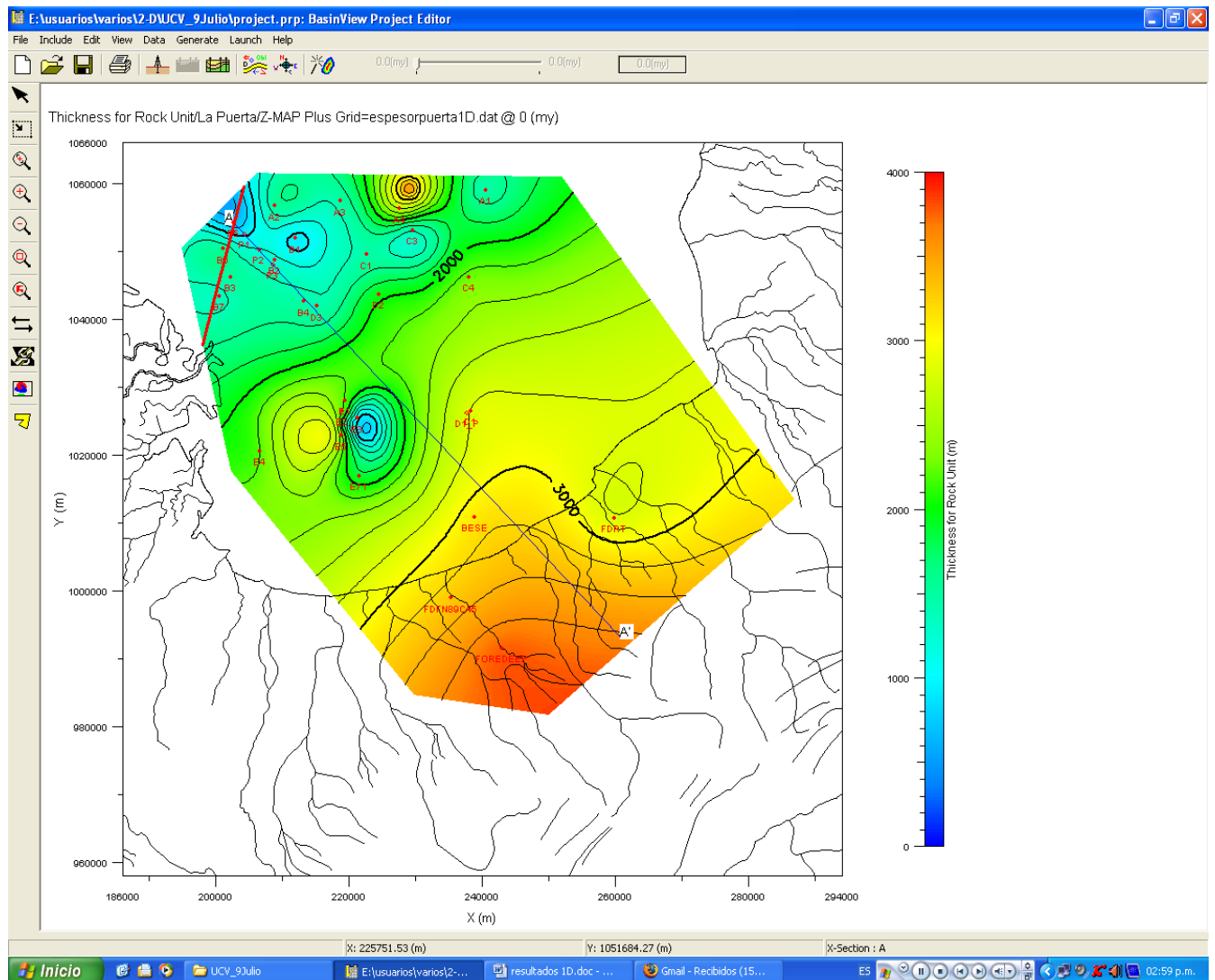
80% Arenisca

#### **Anexo 1.17: Mapa Litológico Formación**

**La Puerta**  
**Ma**

**11,61**

La sedimentación de la Formación La Puerta es generada debido al levantamiento andino, puede llegar a alcanzar los 5 km en algunas localidades tanto en el flanco norandino como en el surandino (Schlumberger, 1997). El mapa de espesor correspondiente a esta formación (Ver figura 36), refleja la acumulación de un gran espesor de sedimentos hacia el sur de la cuenca, alcanzando los 3000m de espesor. Las diferencias significativas, observadas en pozos cercanos son desconocidas, pero pudiera ser atribuido a la presencia de fallas, las cuales no están reportadas los datos de origen.

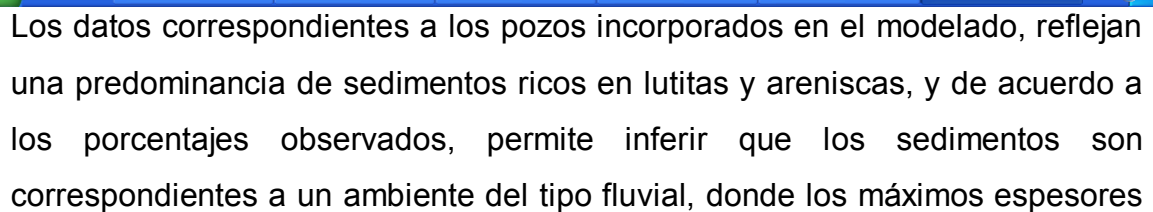


De acuerdo a los datos de origen estos sedimentos están compuestos principalmente por altos

porcentajes de lutita y limolita (Ver Figura 37). La lutita alcanza un valor correspondiente de 80% hacia el extremo norte de la cuenca, disminuyendo a un 40% hacia el sur. La limolita varía solo de un 10%, reflejado al norte de la cuenca y aumentando solo al 20% hacia el sur de la cuenca.

**Anexo 1.18:** Mapa de Espesor Formación La Puerta





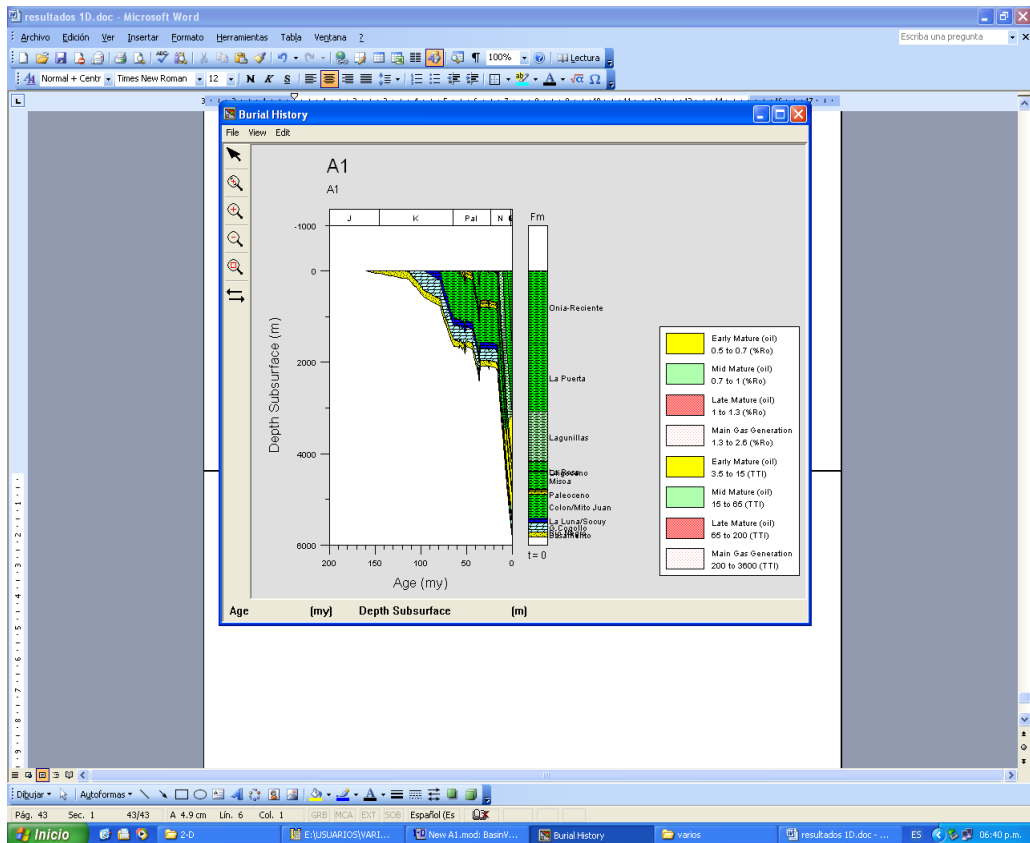
Los datos correspondientes a los pozos incorporados en el modelado, reflejan una predominancia de sedimentos ricos en lutitas y areniscas, y de acuerdo a los porcentajes observados, permite inferir que los sedimentos son correspondientes a un ambiente del tipo fluvial, donde los máximos espesores

son alcanzados hacia el sur (Ver figura 19). La Formación Onia fue depositada en un ambiente fluvio-deltaico (Mann et al, 2006).

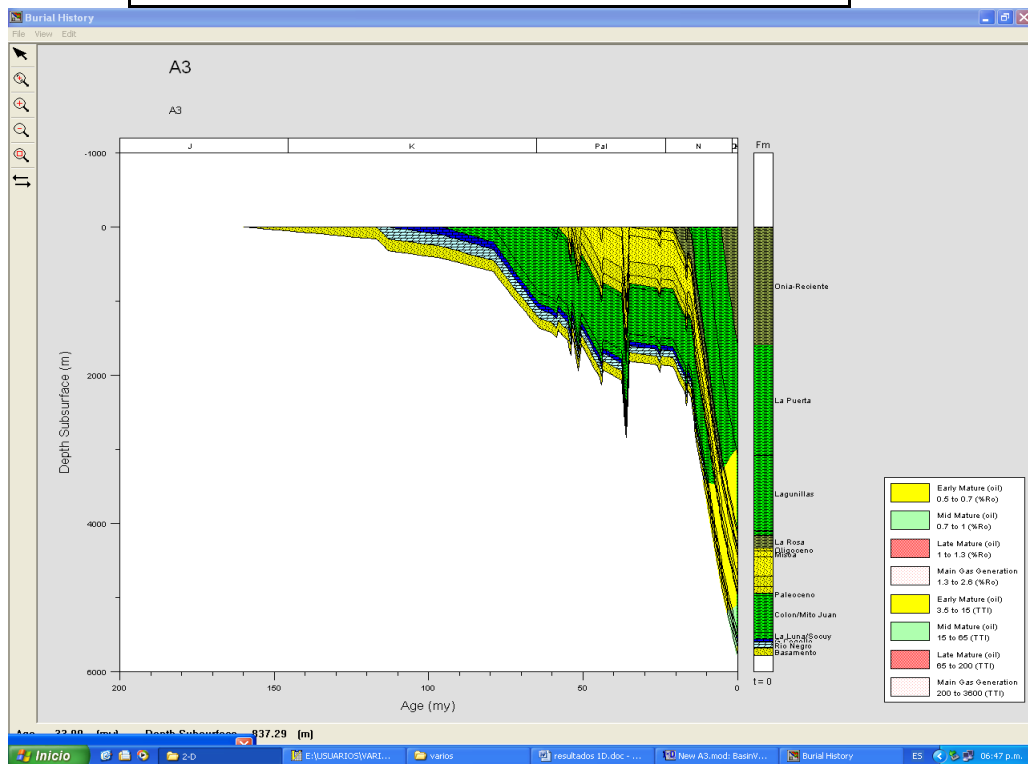
La litología que predomina en esta formación, corresponde a sedimentos clásticos, con altas proporciones de lutitas 70%, siendo el 30% restante representado por areniscas, las cuales alcanzan su máximo valor hacia el sur de la cuenca. Al norte de la cuenca el porcentaje de lutitas varía de 50-80%, siendo el resto areniscas de 5-13%, en algunos casos es observada la incorporación de limolita, la cual varía de un 10-45%. Hacia el sur de la cuenca es observado un enriquecimiento relativo en cuanto al porcentaje de areniscas (Ver figura 39).



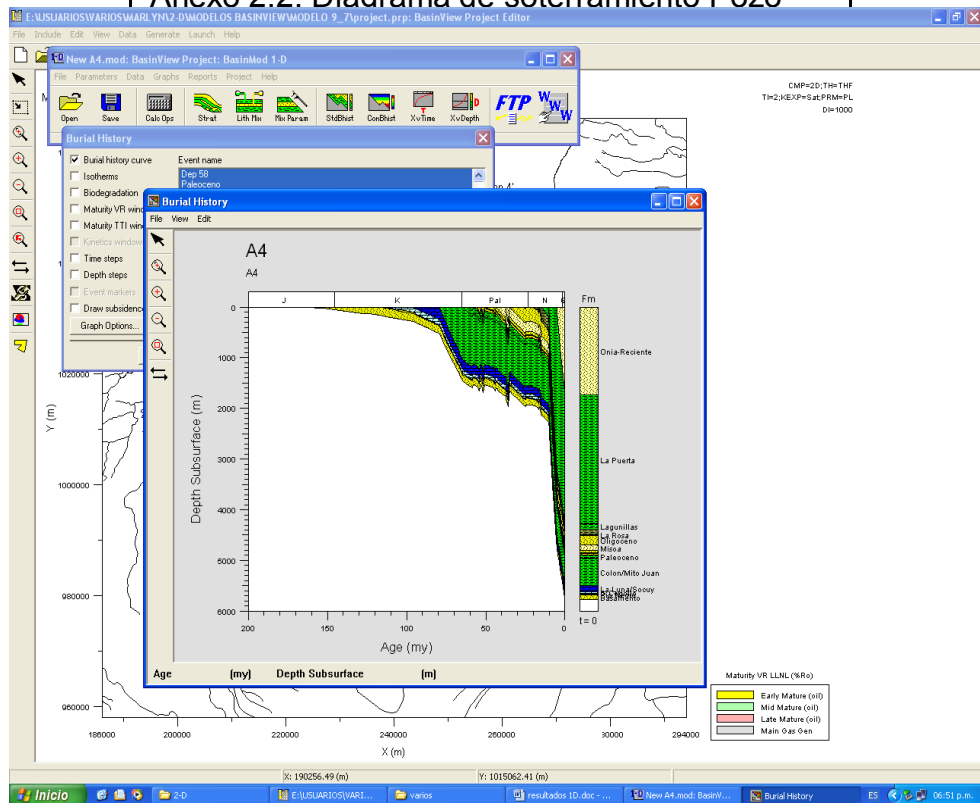
## Diagramas de soterramiento



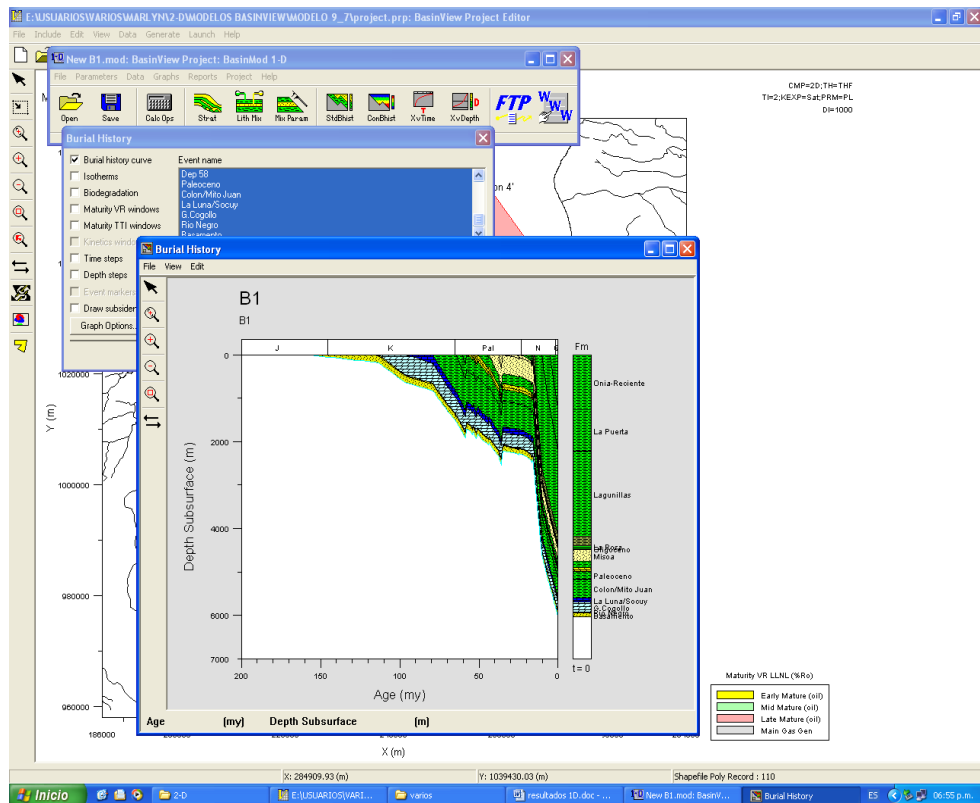
### Anexo 2.1: Diagrama de soterramiento Pozo



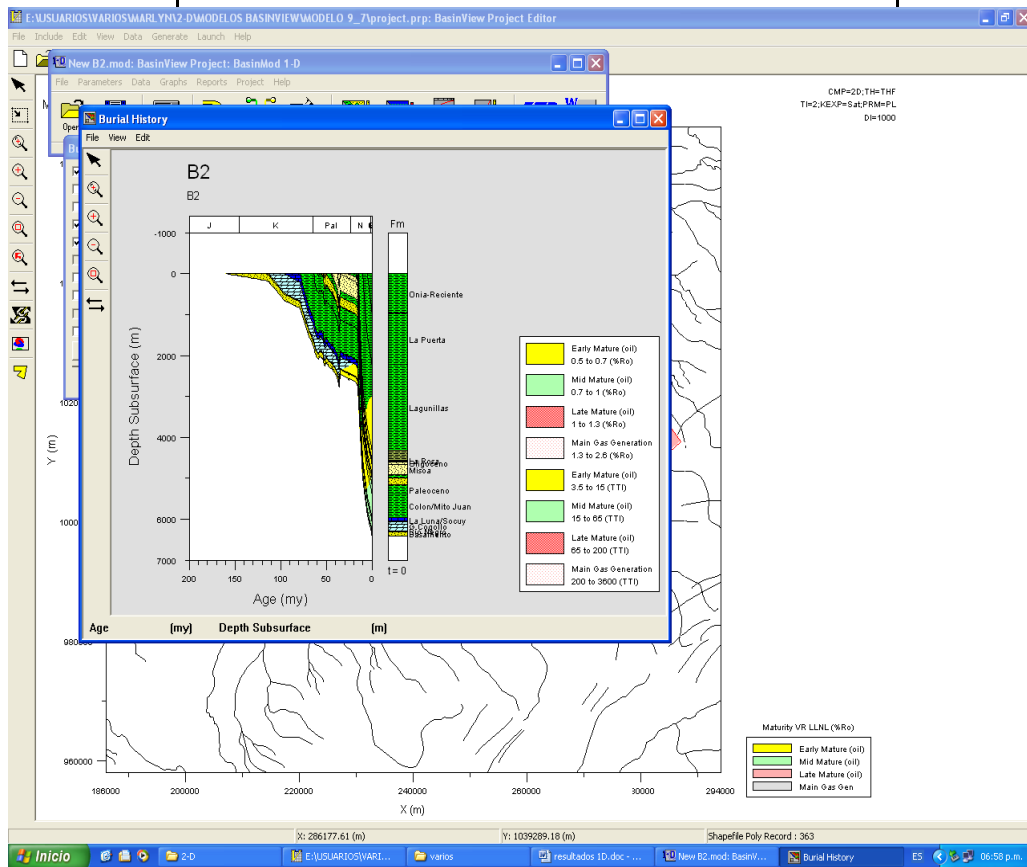
## Anexo 2.2: Diagrama de soterramiento Pozo



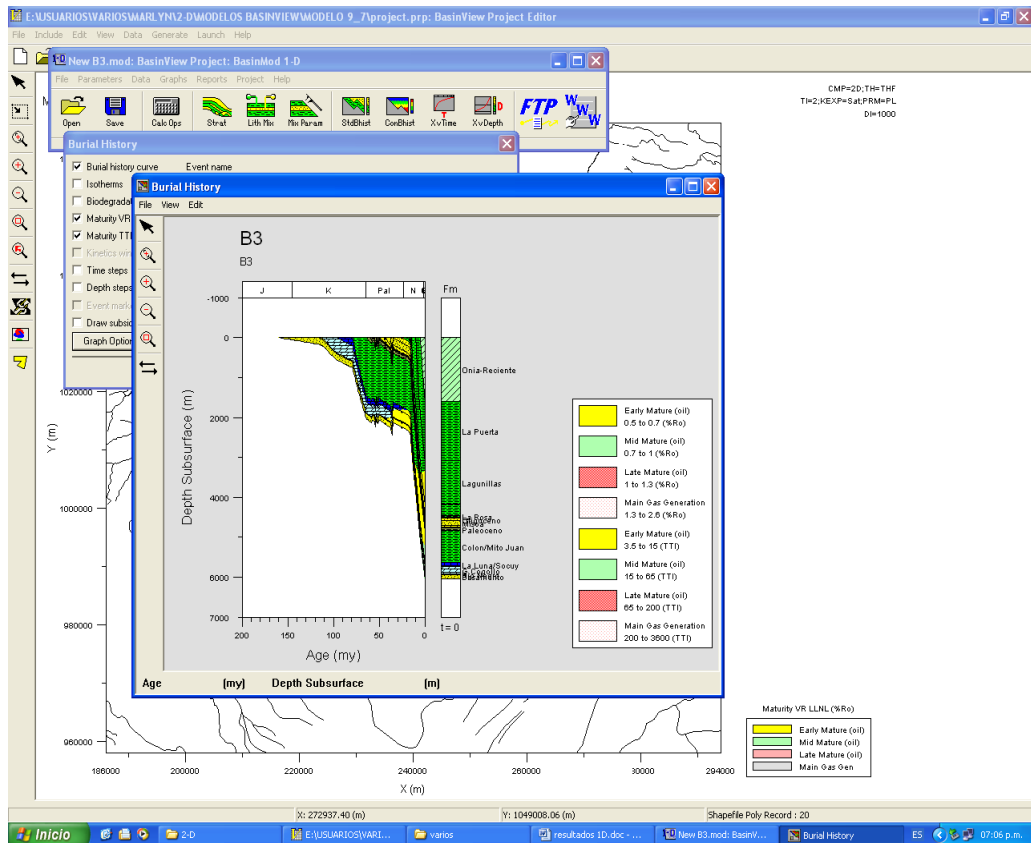
## Anexo 2.3: Diagrama de soterramiento Pozo



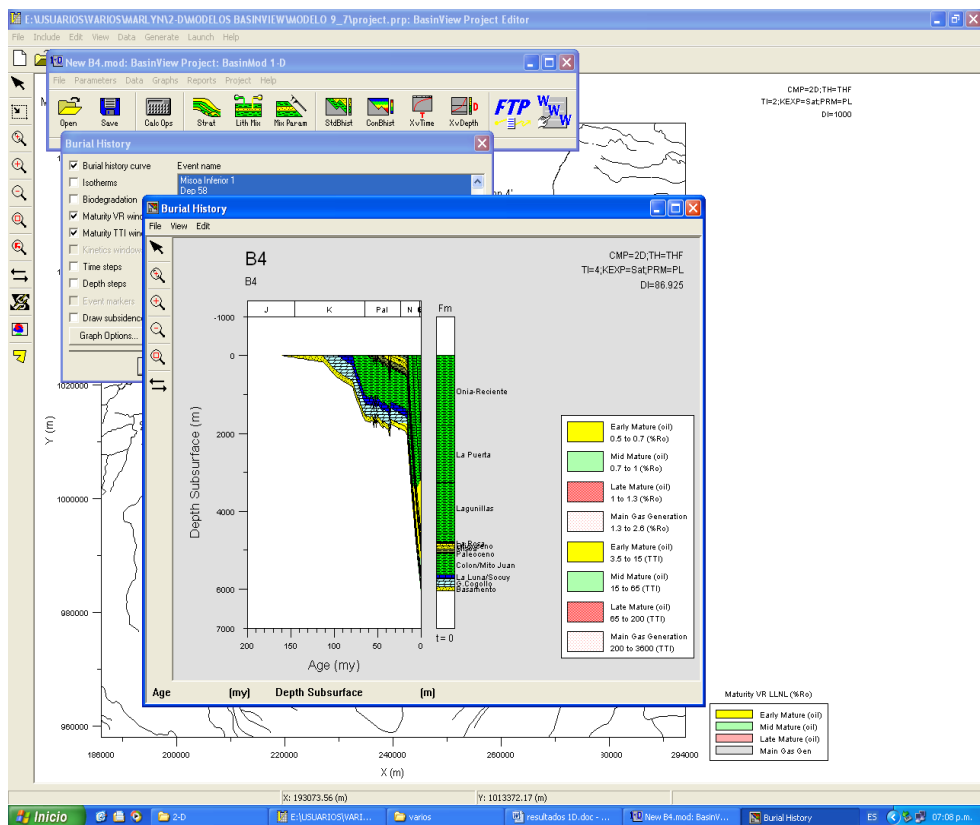
## Anexo 2.4: Diagrama de soterramiento Pozo



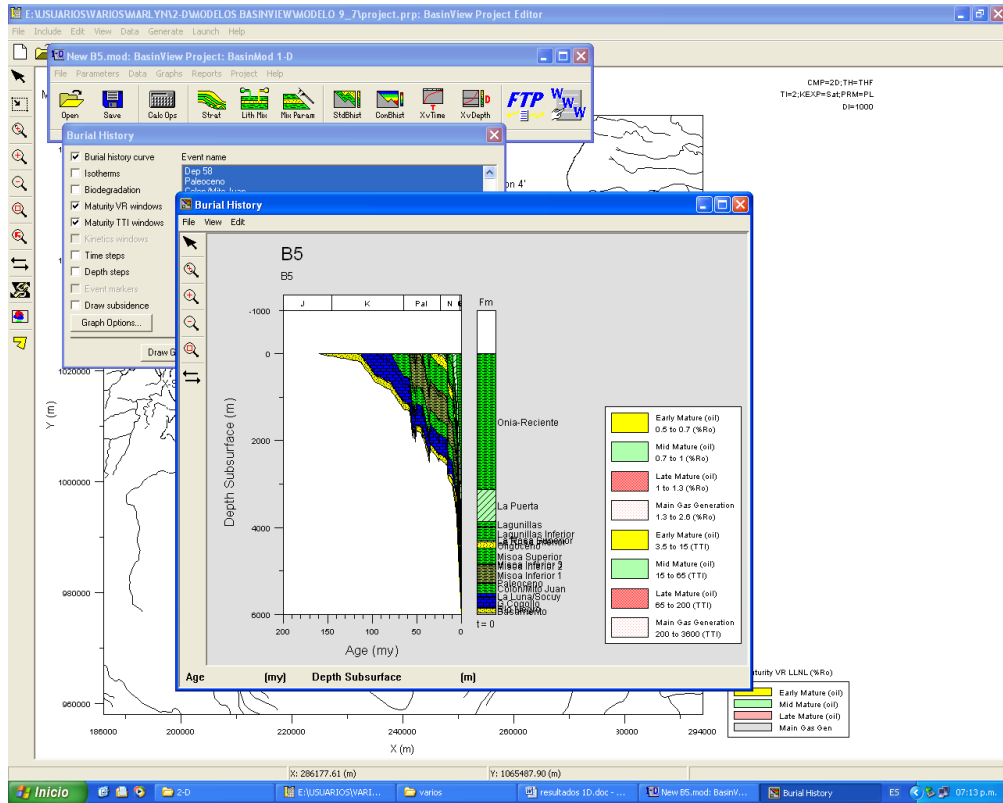
## Anexo 2.5: Diagrama de soterramiento Pozo



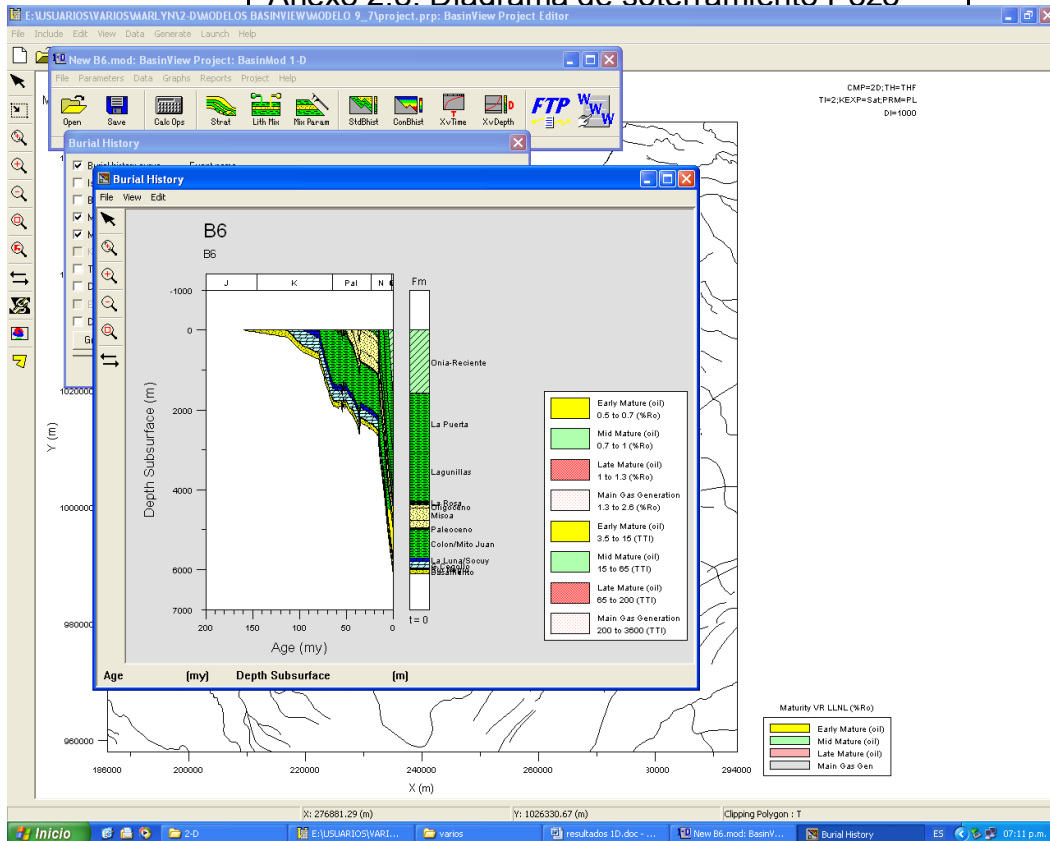
Anexo 2.6: Diagrama de soterramiento Pozo

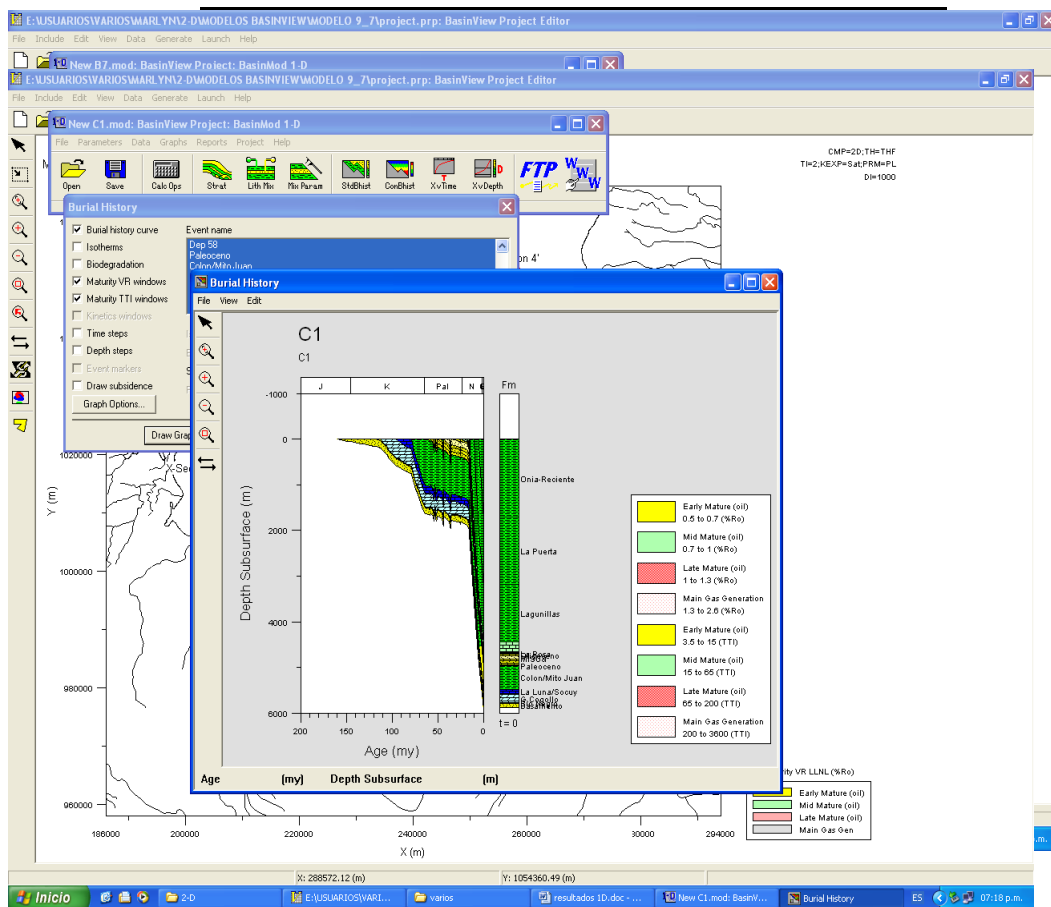


## Anexo 2.7: Diagrama de soterramiento Pozo

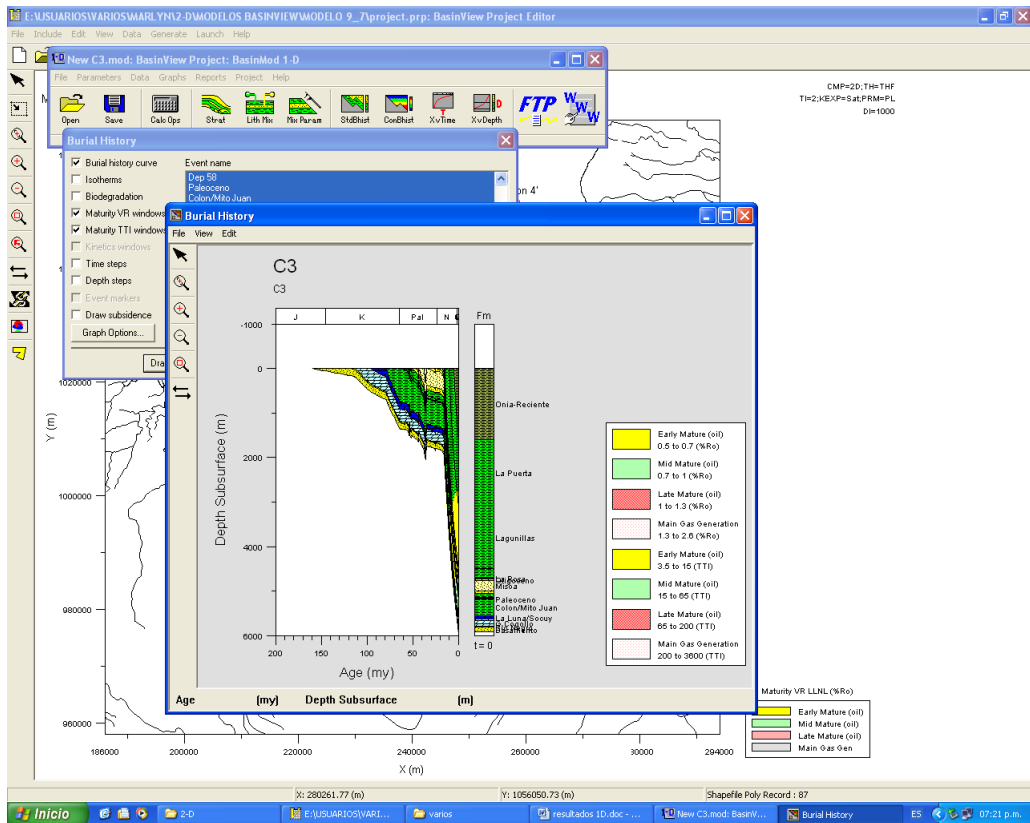


## Anexo 2.8: Diagrama de soterramiento Pozo

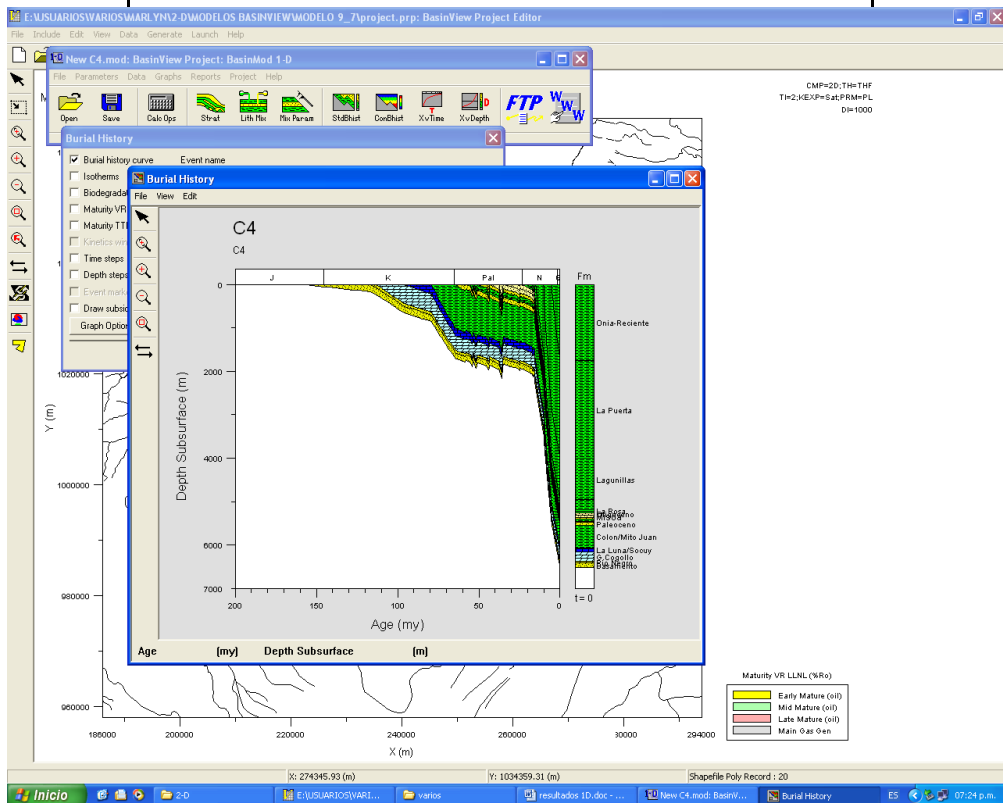




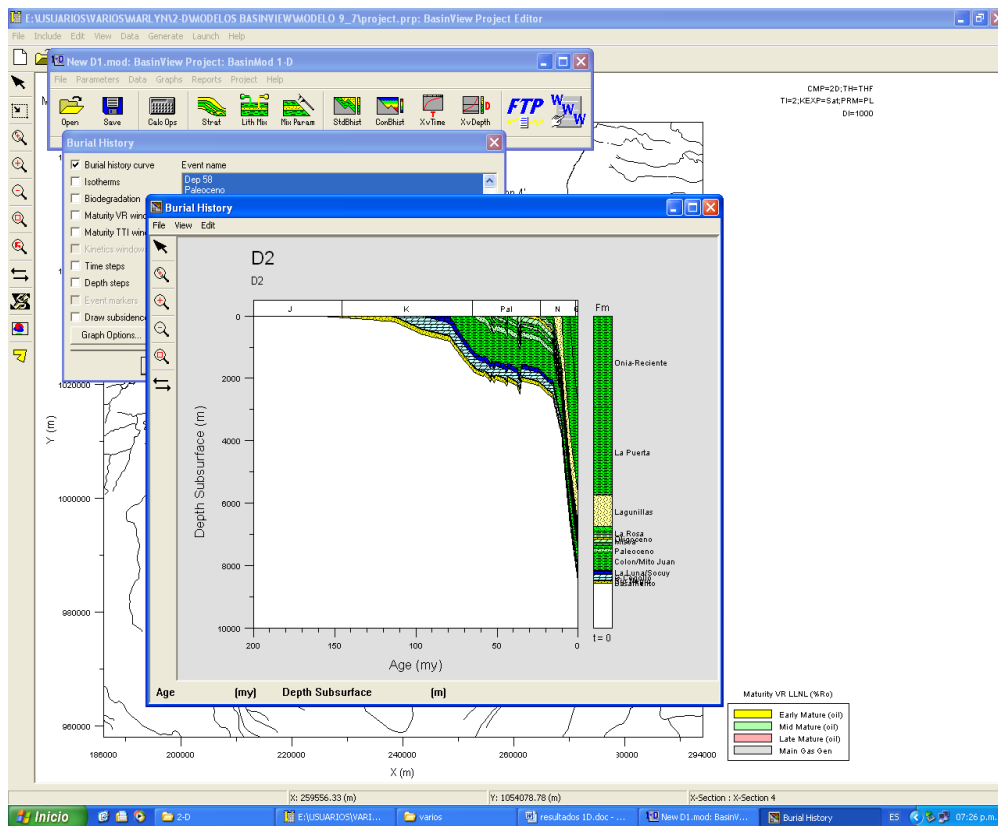
Anexo 2.11: Diagrama de soterramiento Pozo C1



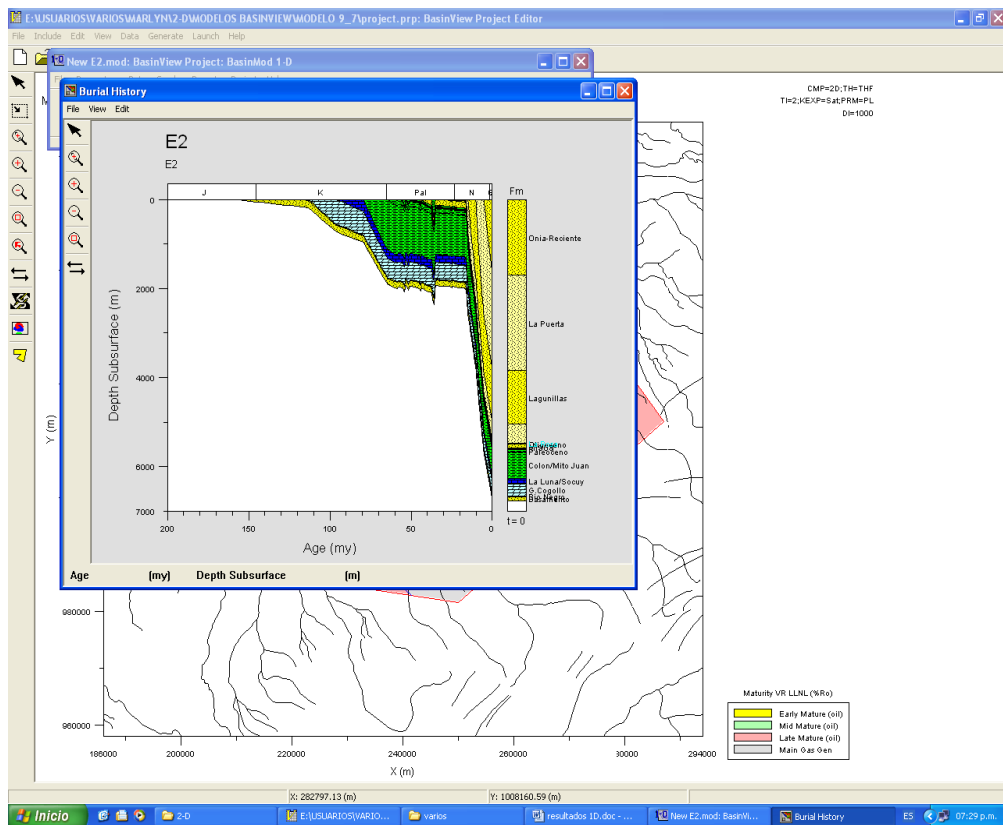
## Anexo 2.12: Diagrama de soterramiento Pozo C3



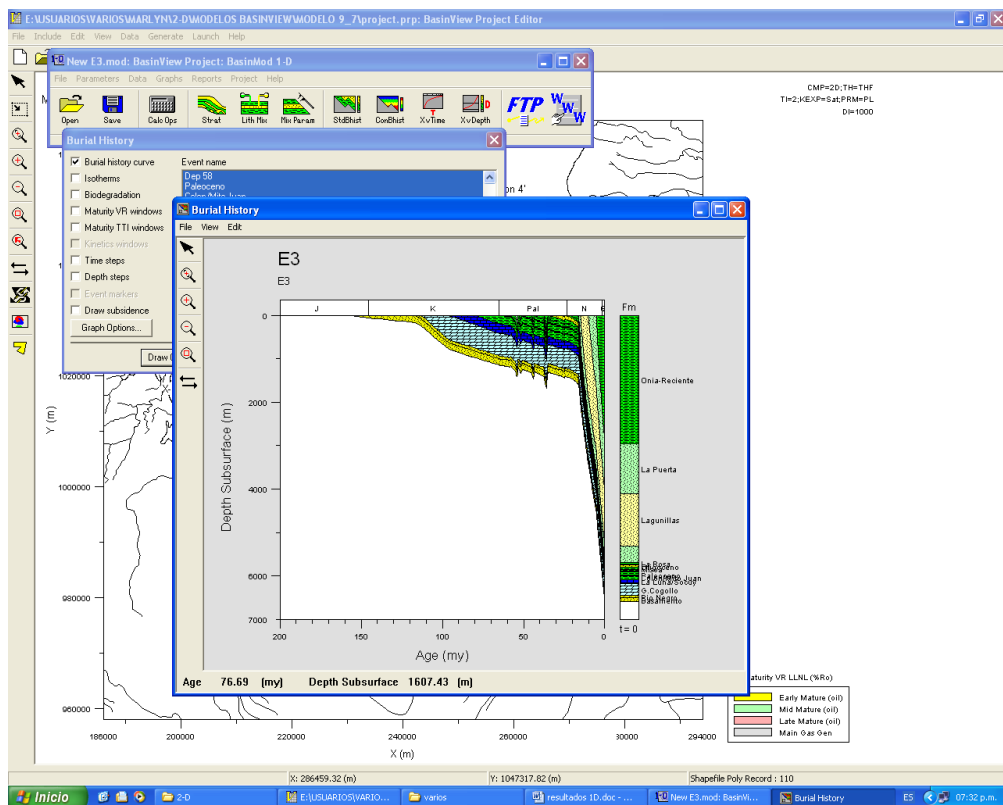
## Anexo 2.13: Diagrama de soterramiento Pozo C4



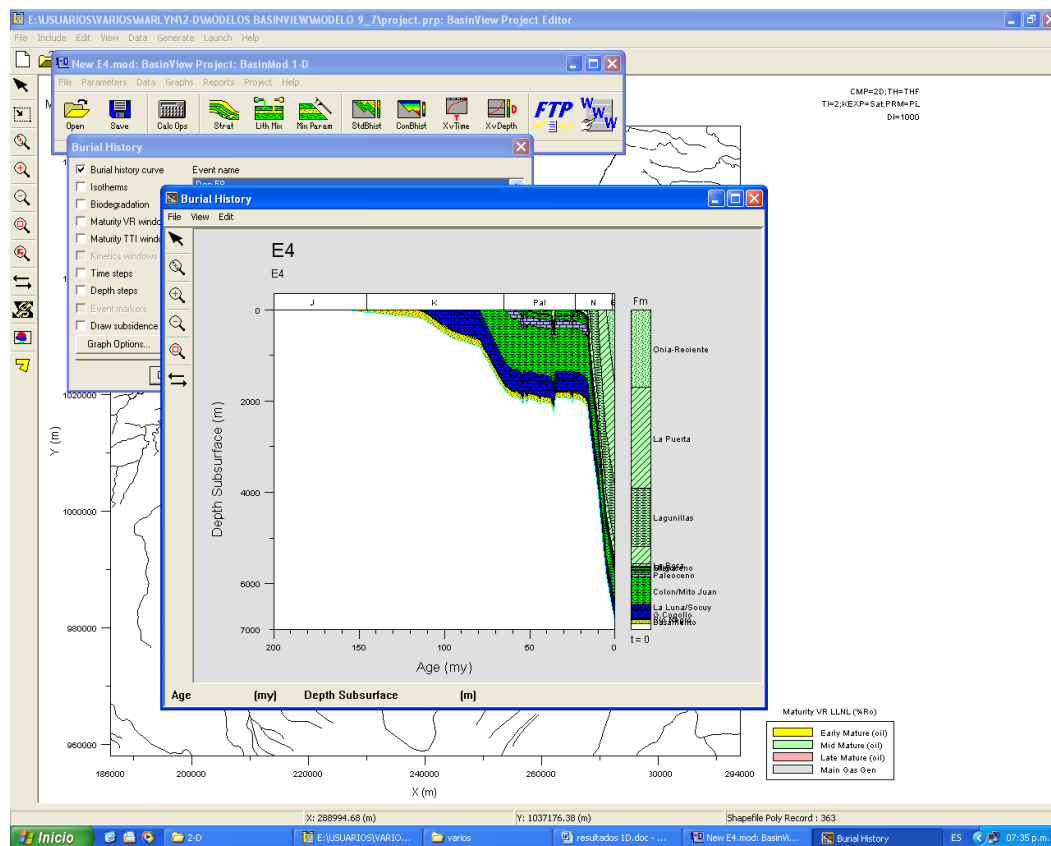
## Anexo 2.14: Diagrama de soterramiento Pozo D2



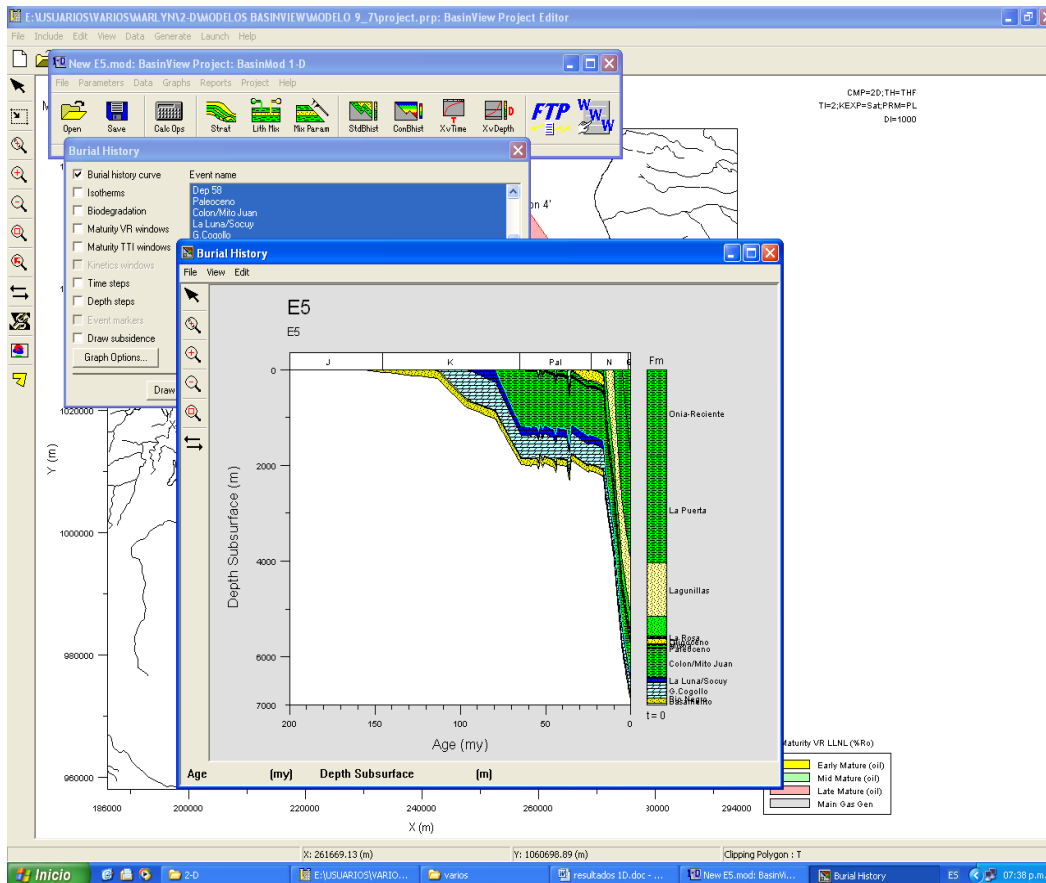
Anexo 2.15: Diagrama de soterramiento Pozo E2



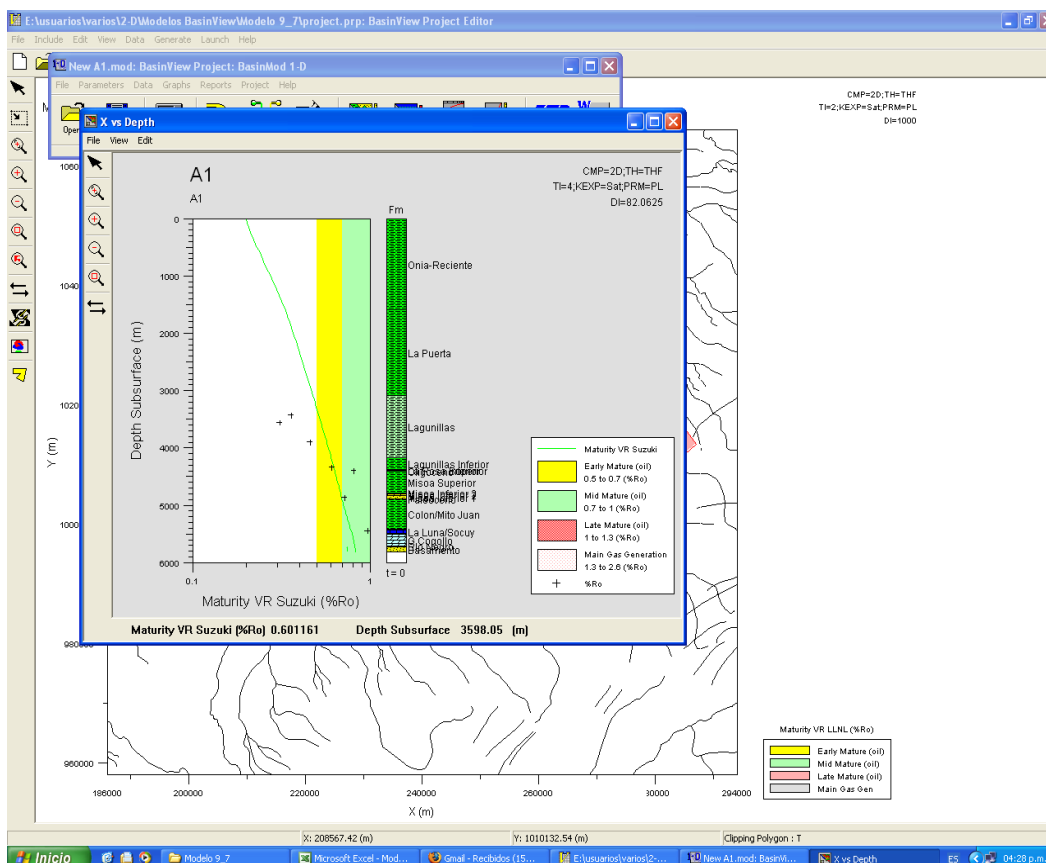
E3



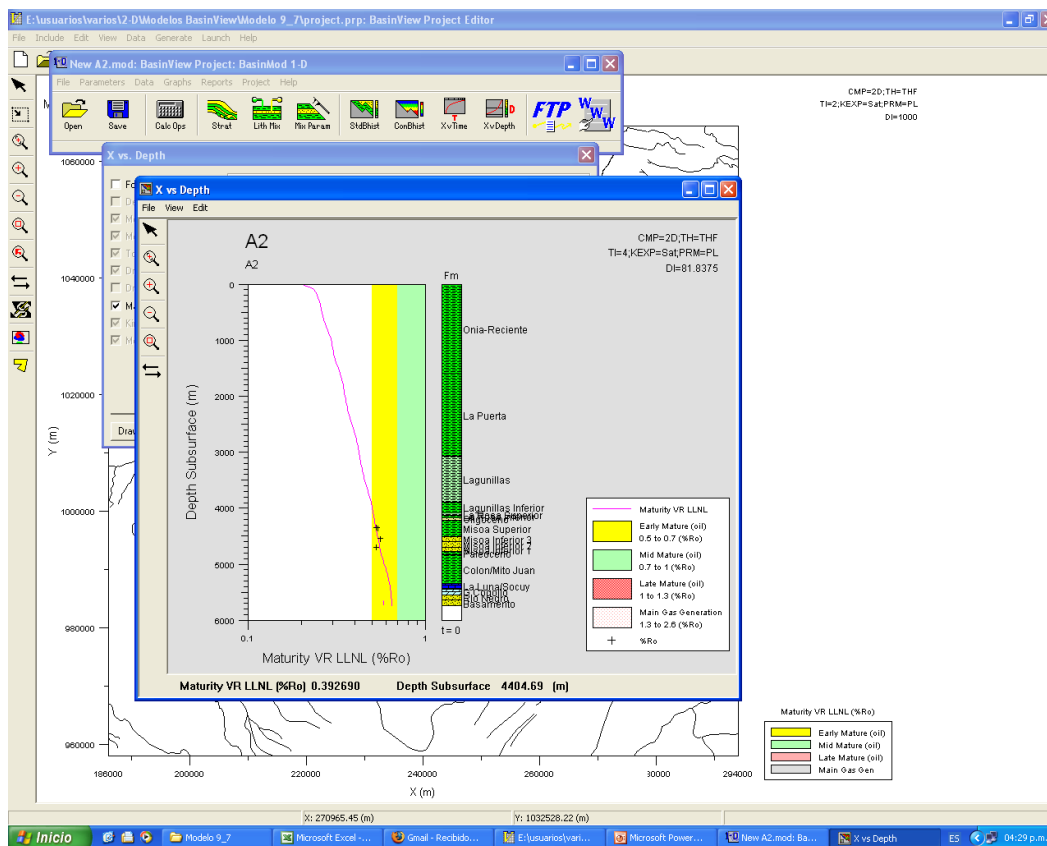
E4



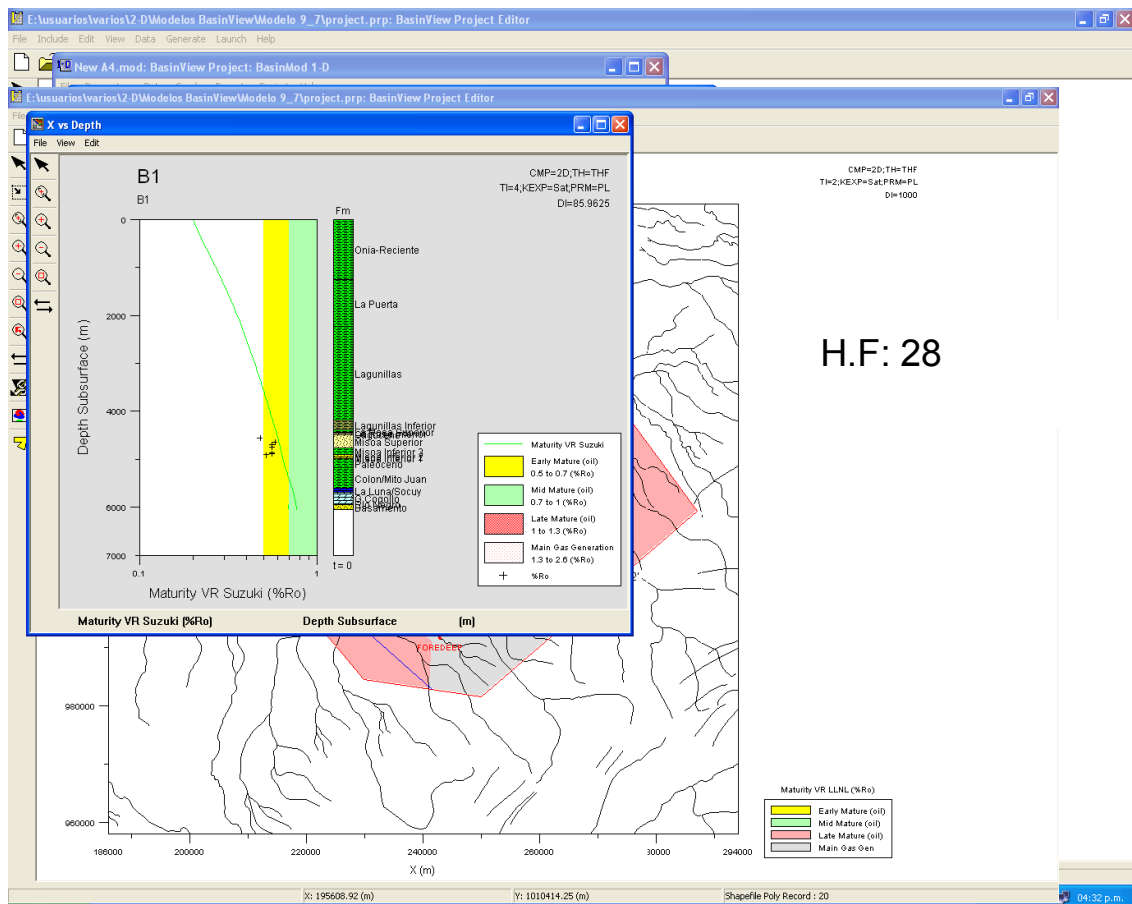
## Calibraciones



28 mW/m<sup>2</sup>



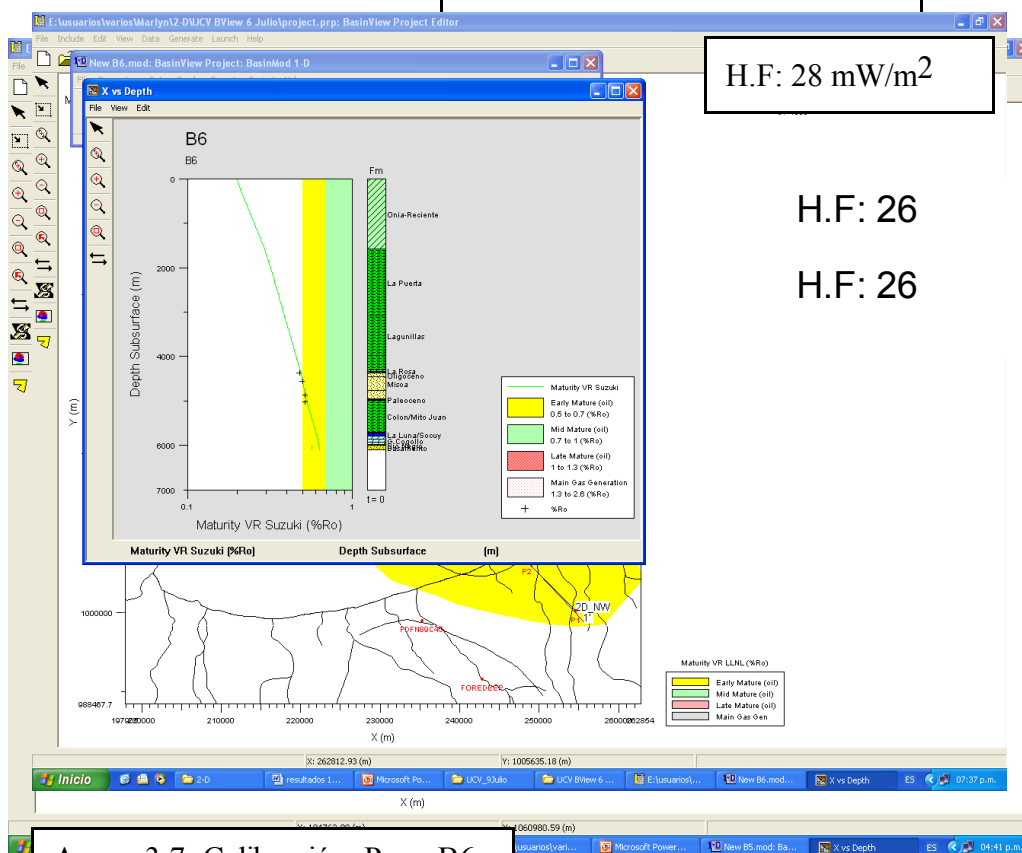
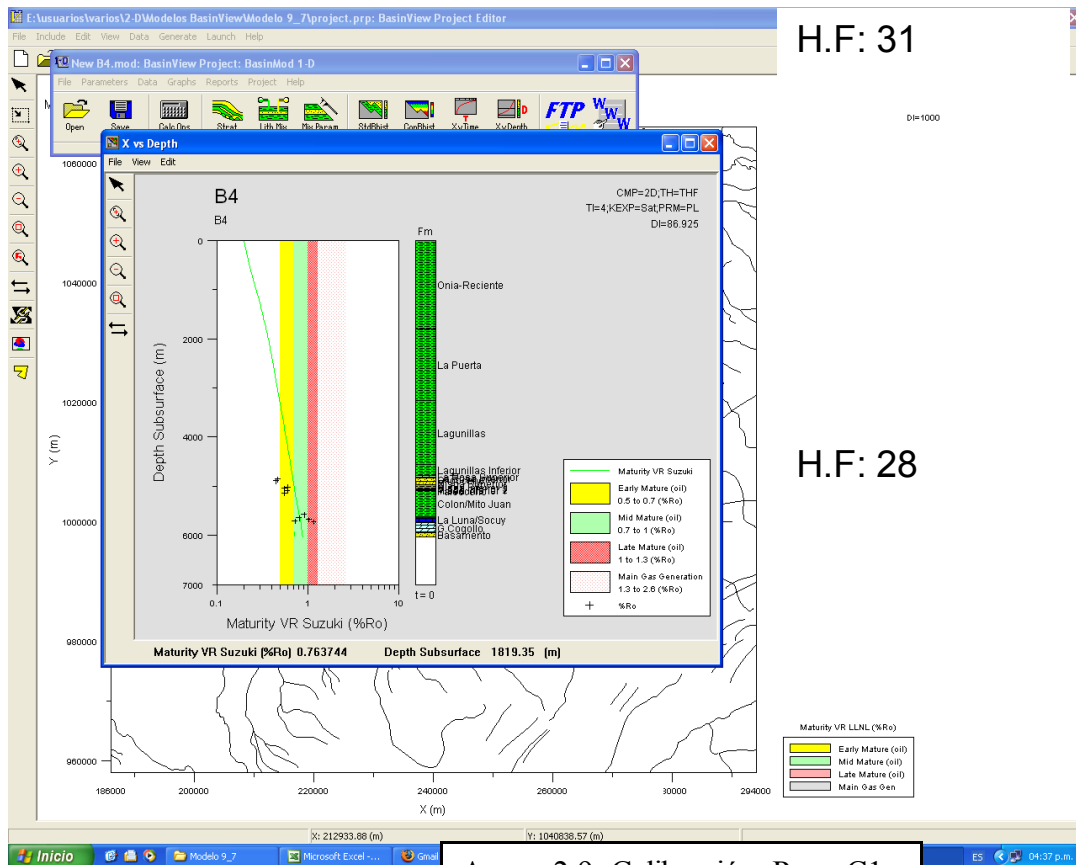
3 mW/m<sup>2</sup>

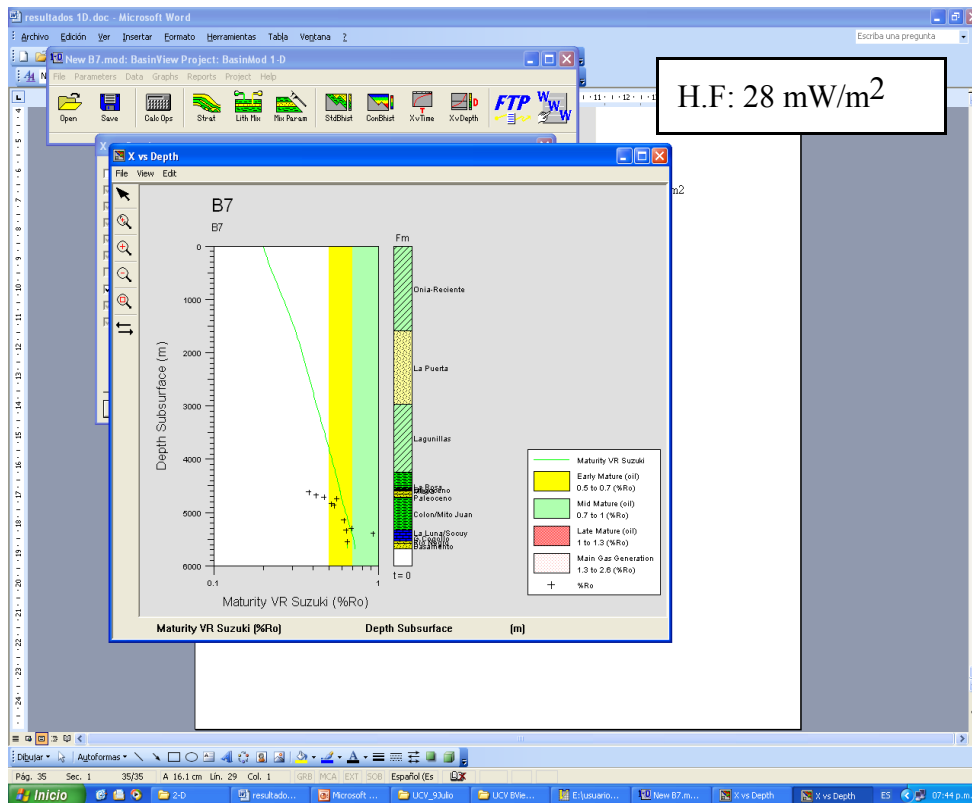


A Anexo 3.5: Calibración. Pozo B4

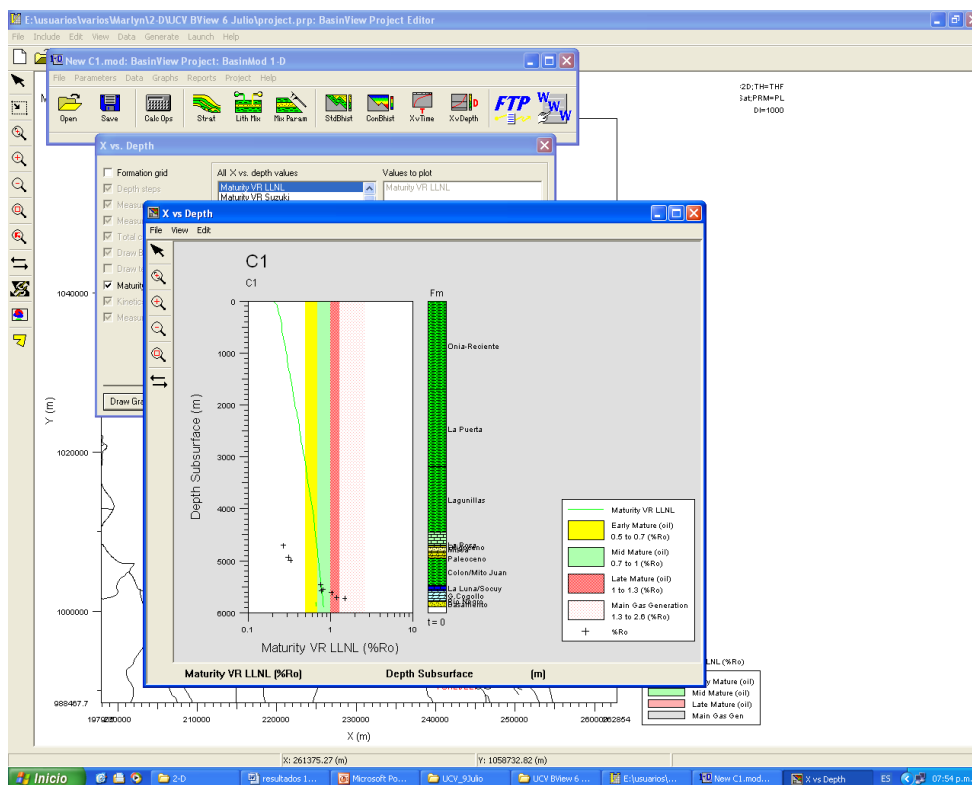
H.F: 31 mW/m<sup>2</sup>

3 mW/m<sup>2</sup>



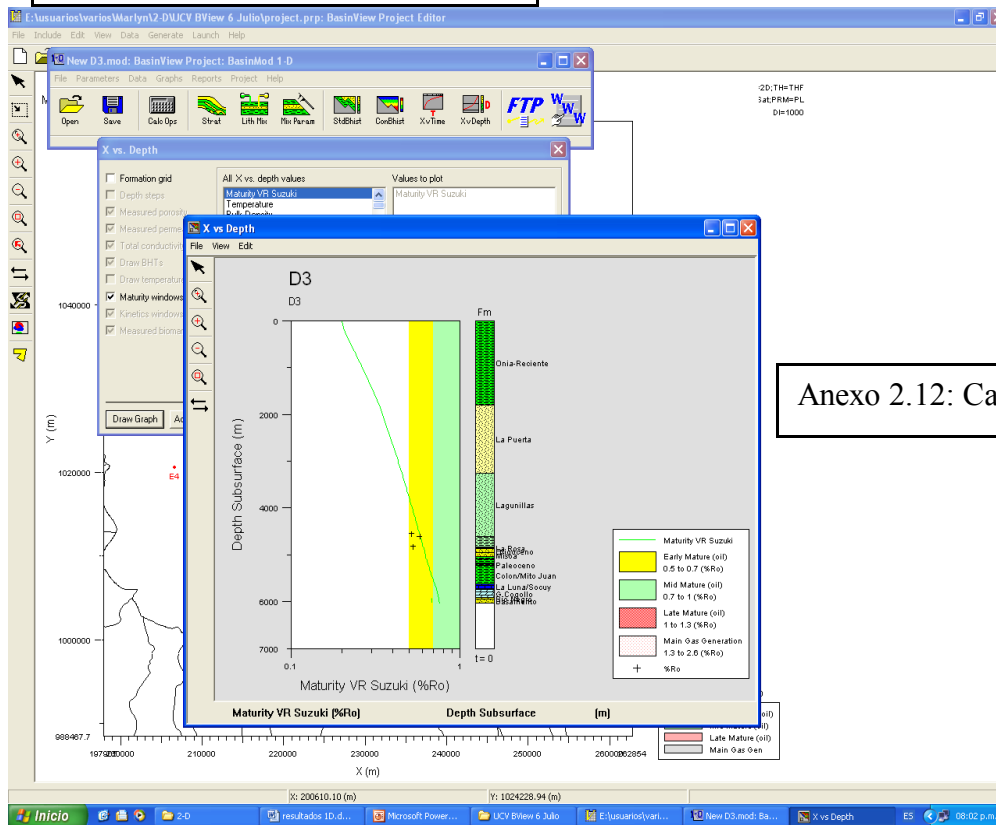


Anexo 3.8: Calibración. Pozo B7



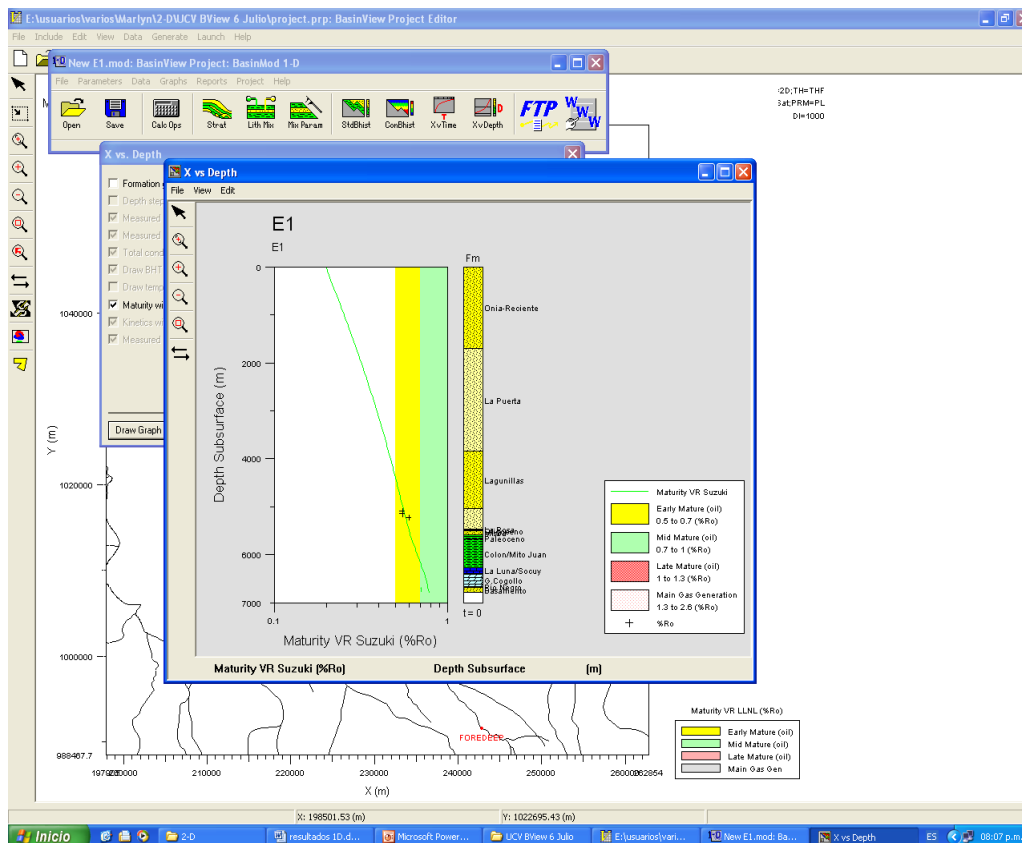
### Anexo 3.9: Calibración. Pozo C1

3 mW/m<sup>2</sup>



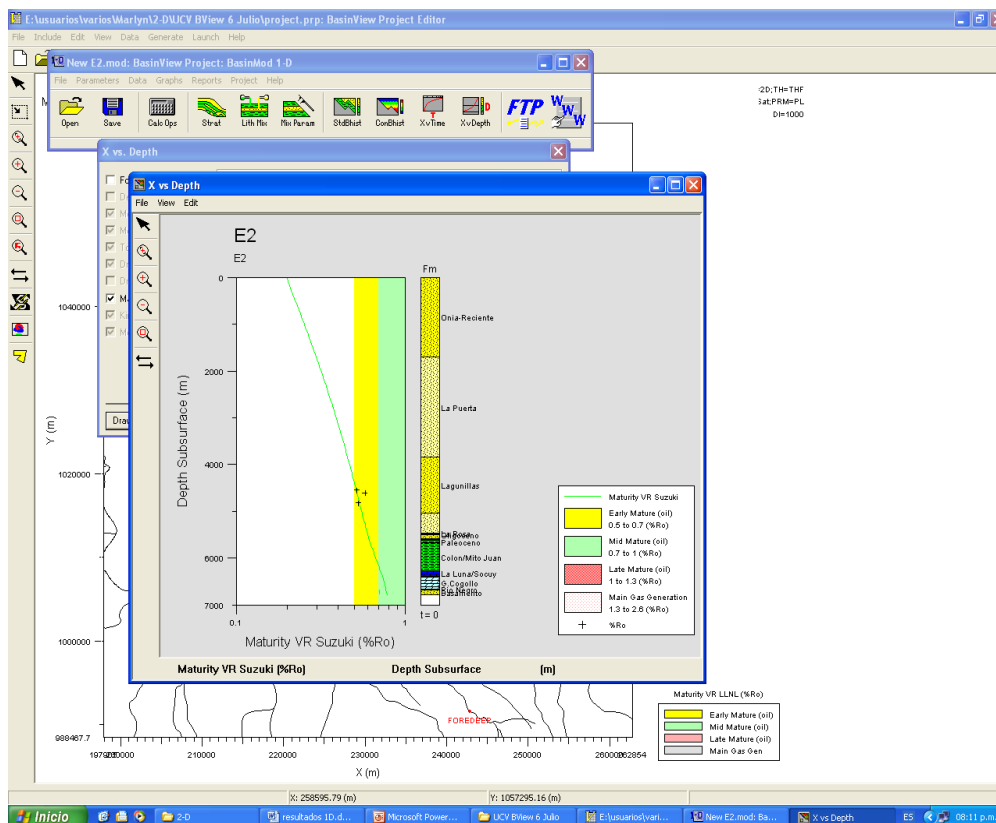
### Anexo 2.12: Calibración. Pozo E2

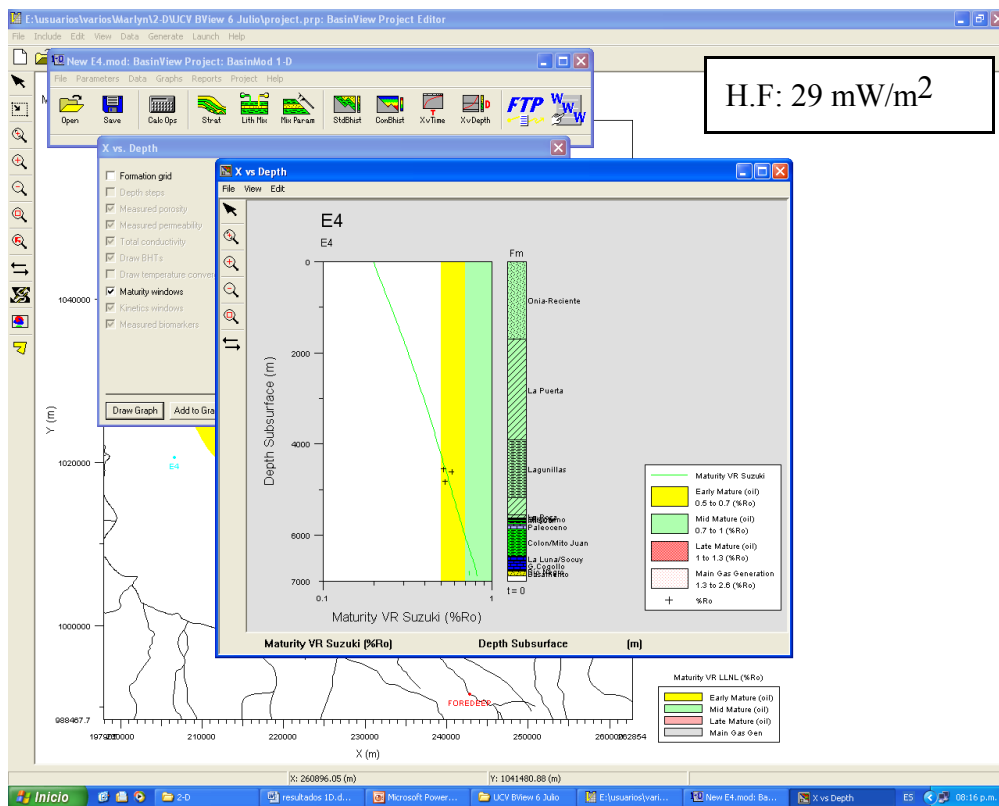
1 mW/m<sup>2</sup>



### Anexo 3.11: Calibración. Pozo E1

1 mW/m<sup>2</sup>





Anexo 3.13: Calibración. Pozo E4

## Datos de entrada del modelo

### Pozo A1

| Formación o<br>Nombre del<br>evento | Tipo | Edad del<br>comienzo<br>(M.a) | Profundida<br>d del tope<br>(m) | Espesor<br>erosionado<br>(m) | Litología       |
|-------------------------------------|------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente                       | F    | 5,2                           | 0                               |                              | A2Lm32Ltt66     |
| La Puerta                           | F    | 10,2                          | 1591                            |                              | A32Lm22Ltt46    |
| Lagunillas                          | F    | 15                            | 3078                            |                              | A20Lm36Ltt44    |
| Lagunillas<br>Inferior              | F    | 16                            | 4167                            |                              | A30Lm34Ltt36    |
| SB 16.5 Disc                        | E    | 16.5                          |                                 | -62                          | A20Lm40Ltt40    |
| Dep 16.5                            | D    | 17                            |                                 | 62                           | A20Lm40Ltt40    |
| La Rosa<br>Superior                 | F    | 21                            | 4377                            |                              | A20Lm40Ltt40    |
| La Rosa Inferior                    | F    | 24,8                          | 4392                            |                              | A40Lm20Ltt40    |
| SB 26 Disc                          | E    | 25                            |                                 | -62                          | A51Lm10Ltt39    |
| Dep 26                              | D    | 26                            |                                 | 62                           | A51Lm10Ltt39    |
| Oligoceno                           | F    | 35                            | 4398                            |                              | A40Lm20Ltt40    |
| SB 36 Disc                          | E    | 36                            |                                 | -312                         | A30Lm14Ltt56    |
| Dep 36                              | D    | 37,5                          |                                 | 312                          | A30Lm14Ltt56    |
| Misoa Superior                      | F    | 43,5                          | 4399                            |                              | A30Lm14Ltt56    |
| SB 44 Disc                          | E    | 44                            |                                 | -31                          | A85Lm15         |
| Dep 44                              | D    | 45                            |                                 | 31                           | A85Lm15         |
| Misoa Inferior 3                    | F    | 50,5                          | 4779                            |                              | A85Lm15         |
| SB 51.5 Disc                        | E    | 51,5                          |                                 | -156                         | A83Lm17         |
| Dep 51.5                            | D    | 52,5                          |                                 | 156                          | A83Lm17         |
| Misoa Inferior 2                    | F    | 53,5                          | 4800                            |                              | A83Lm17         |
| SB 54 Disc                          | E    | 54                            |                                 | -62                          | A83Lm17         |
| Dep 54                              | D    | 55                            |                                 | 62                           | A83Lm17         |
| Misoa Inferior 1                    | F    | 57,5                          | 4833                            |                              | A83Lm17         |
| SB 58 Disc                          | E    | 58                            |                                 | -62                          | A30Lm25Ltt45    |
| Dep 58                              | D    | 60,5                          |                                 | 62                           | A30Lm25Ltt45    |
| Paleoceno                           | F    | 64                            | 4886                            |                              | A30Lm25Ltt45    |
| Colon/Mito Juan                     | F    | 79                            | 4887                            |                              | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy                       | F    | 96                            | 5418                            |                              | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo                           | F    | 113                           | 5509                            |                              | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro                           | F    | 117                           | 5714                            |                              | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento                           | F    | 160                           | 5718                            |                              | Arenisca        |

Anexo 4.1: Estratigrafía correspondiente al pozo A1

## Pozo A2

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A2Lm32Ltt66     |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1590                     |                        | A32Lm22Ltt46    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3077                     |                        | A20Lm36Ltt44    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 3886                     |                        | A30Lm34Ltt36    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    | A20Lm40Ltt40    |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A20Lm40Ltt40    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4084                     |                        | A20Lm40Ltt40    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4130                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    | A51Lm10Ltt39    |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A51Lm10Ltt39    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4164                     |                        | A51Lm10Ltt39    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   | A51Lm10Ltt39    |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A25Ltt75        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4215                     |                        | A25Ltt75        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -62                    | A85Ltt15        |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 62                     | A85Ltt15        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4508                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -156                   | A82Ltt18        |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 156                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 4600                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -120                   | A82Ltt18        |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 120                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4700                     |                        | A83Lm17         |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    | A30Ltt70        |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A30Ltt70        |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 4777                     |                        | A30Ltt70        |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 4832                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5346                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5440                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 5550                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 5642                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.2: Estratigrafía correspondiente al pozo A2

## Pozo A4

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A50Lm40Ltt55    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1730                     |                        | A18Lm14Ltt68    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4281                     |                        | A23Ltt77        |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4380                     |                        | A10Ltt90        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    | A10Ltt90        |
| Dep 16.5            | D    | 17                      | 4486                     | 62                     | A10Ltt90        |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4512                     |                        | A10Ltt90        |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    |                          |                        | A18Ltt82        |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    | A88Ltt12        |
| Dep 26              | D    | 26                      | 4514                     | 31                     | A88Ltt12        |
| Oligoceno           | F    | 35                      |                          |                        | A88Ltt12        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   | A62Ltt38        |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A62Ltt38        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4690                     |                        | A62Ltt38        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -62                    | A83Ltt17        |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 62                     | A83Ltt17        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4808                     |                        | A83Ltt17        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -156                   | A82Ltt18        |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 156                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53.5                    | 4850                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -120                   | A82Ltt18        |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 120                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4861                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    | A30Lm30Ltt40    |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A30Lm30Ltt40    |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 4889                     |                        | A30Lm30Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 4956                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/ Socuy      | F    | 96                      | 5499                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5611                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 5660                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 5673                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.3: Estratigrafía correspondiente al pozo A4

## Pozo B1

| Formación o evento  | Tip o | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|-------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F     | 5,2                     | 0                        |                        | A13Lm27Ltt60    |
| La Puerta           | F     | 10,2                    | 1260                     |                        | A12Lm28Ltt60    |
| Lagunillas          | F     | 15                      | 2226                     |                        | A29Lm2Ltt69     |
| Lagunillas Inferior | F     | 16                      | 4176                     |                        | A20Ltt80        |
| SB 16.5 Disc        | E     | 16,5                    |                          | -62                    | Lm30Ltt70       |
| Dep 16.5            | D     | 17                      |                          | 62                     | Lm30Ltt70       |
| La Rosa Superior    | F     | 21                      | 4390                     |                        | Lm30Ltt70       |
| La Rosa Inferior    | F     | 24,8                    | 4437                     |                        | A5Lm45Ltt50     |
| SB 26 Disc          | E     | 25                      |                          | -31                    | A68Ltt32        |
| Dep 26              | D     | 26                      |                          | 31                     | A68Ltt32        |
| Oligoceno           | F     | 35                      | 4459                     |                        | A68Ltt32        |
| SB 36 Disc          | E     | 36                      |                          | -312                   | A53Ltt47        |
| Dep 36              | D     | 37,5                    |                          | 312                    | A53Ltt47        |
| Misoa Superior      | F     | 43,5                    | 4493                     |                        | A53Ltt47        |
| SB 44 Disc          | E     | 44                      |                          | -62                    | A45Ltt55        |
| Dep 44              | D     | 45                      |                          | 62                     | A45Ltt55        |
| Misoa Inferior 3    | F     | 50,5                    | 4758                     |                        | A45Ltt55        |
| SB 51.5 Disc        | E     | 51,5                    |                          | -109                   | A82Ltt18        |
| Dep 51.5            | D     | 52,5                    |                          | 109                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 2    | F     | 53.5                    | 4900                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 54 Disc          | E     | 54                      |                          | -62                    | A82Ltt18        |
| Dep 54              | D     | 55                      |                          | 62                     | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 1    | F     | 58                      | 4953                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 58 Disc          | E     | 58,5                    |                          |                        | A30Ltt70        |
| Dep 58              | D     | 60,5                    |                          |                        | A30Ltt70        |
| Paleoceno           | F     | 64                      | 4992                     |                        | A30Ltt70        |
| Colon/Mito Juan     | F     | 79                      | 5176                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F     | 96                      | 5605                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F     | 113                     | 5692                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F     | 117                     | 5924                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F     | 160                     | 5939                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.4: Estratigrafía correspondiente al pozo B1

## Pozo B2

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A14Lm26Ltt60    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 965                      |                        | A25Ltt75        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 2219                     |                        | A29Lm2Ltt69     |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4315                     |                        | A20Ltt80        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    | Lm30Ltt70       |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | Lm30Ltt70       |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4549                     |                        | Lm30Ltt70       |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4576                     |                        | A5Lm45Ltt50     |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    | A68Ltt32        |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A68Ltt32        |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4598                     |                        | A68Ltt32        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   | A53Ltt47        |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A53Ltt47        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4661                     |                        | A53Ltt47        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -62                    | A45Ltt55        |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 62                     | A45Ltt55        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4908                     |                        | A45Ltt55        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -109                   | A82Ltt18        |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 109                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53.5                    | 5000                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -62                    | A82Ltt18        |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 62                     | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5152                     |                        | A18Ltt82        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    | A35Ltt65        |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A35Ltt65        |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5160                     |                        | A35Ltt65        |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5375                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5961                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6055                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6286                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 6302                     |                        | Arenisca        |

### Pozo B3

| Formación o evento                                  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología    |
|-----------------------------------------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|
| Onia-Reciente                                       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A14Lm45Ltt41 |
| La Puerta                                           | F    | 10,2                    | 1588                     |                        | A45Ltt55     |
| Lagunillas                                          | F    | 15                      | 3088                     |                        | A24Ltt76     |
| Lagunillas Inferior                                 | F    | 16                      | 4175                     |                        | A35Lm10Ltt55 |
| SB 16.5 Disc                                        | E    | 16,5                    |                          | -62                    | A2Lm48Ltt50  |
| Dep 16.5                                            | D    | 17                      |                          | 62                     | A2Lm48Ltt50  |
| La Rosa Superior                                    | F    | 21                      | 4458                     |                        | A2Lm48Ltt50  |
| La Rosa Inferior                                    | F    | 24,8                    | 4489                     |                        | A10Lm40Ltt50 |
| SB 26 Disc                                          | E    | 25                      |                          | -31                    |              |
| Dep 26                                              | D    | 26                      |                          | 31                     | A77Ltt23     |
| Oligoceno                                           | F    | 35                      | 4517                     |                        | A77Ltt23     |
| SB 36 Disc                                          | E    | 36                      |                          | -305                   | A80Ltt20     |
| Anexo 4.5: Estratigrafía correspondiente al pozo B2 |      |                         |                          |                        |              |
| Dep 36                                              | D    | 37,5                    |                          | 305                    | A75Ltt25     |
| Misoa Superior                                      | F    | 43,5                    | 4585                     |                        | A80Ltt20     |
| SB 44 Disc                                          | E    | 44                      |                          | -47                    |              |
| Dep 44                                              | D    | 45                      |                          | 47                     | A75Ltt25     |
| Misoa Inferior 3                                    | F    | 50,5                    | 4698                     |                        | A75Ltt25     |
| SB 51.5 Disc                                        | E    | 51,5                    |                          | -109                   | A10Lm15Ltt75 |
| Dep 51.5                                            | D    | 52,5                    |                          | 109                    | A18Ltt82     |
| Misoa Inferior 2                                    | F    | 53.5                    | 4750                     |                        | A18Ltt82     |
| SB 54 Disc                                          | E    | 54                      |                          | -203                   | A18Ltt82     |
| Dep 54                                              | D    |                         |                          | 203                    | A18Ltt82     |
| Misoa Inferior 1                                    | F    | 58                      | 4760                     |                        | A18Ltt82     |
| SB 58 Disc                                          | E    | 58,5                    |                          | -62                    | A18Ltt82     |
| Dep 58                                              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A18Ltt82     |
| Paleoceno                                           | F    | 64                      | 4772                     |                        | A10Ltt90     |
| Colon/ Mito                                         | F    | 79                      | 4819                     |                        | A1Ltt94C5    |

|               |   |     |      |  |                 |
|---------------|---|-----|------|--|-----------------|
| Juan          |   |     |      |  |                 |
| La Luna/Socuy | F | 96  | 5637 |  | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo     | F | 113 | 5730 |  | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro     | F | 117 | 5919 |  | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento     | F | 160 | 5935 |  | Arenisca        |

Anexo 4.6: Estratigrafía correspondiente al pozo B3

## Pozo B4

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Top Depth (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|---------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0             |                        | A15Lm21Ltt64    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1796          |                        | A43Ltt57        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3257          |                        | A34Lm10Ltt56    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4551          |                        | A32Ltt68        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |               | -62                    | Lm50Ltt50       |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |               | 62                     | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4782          |                        | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4812          |                        | Lm50Ltt50       |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |               | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |               | 31                     | A78Ltt22        |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4835          |                        | A78Ltt22        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |               | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |               | 312                    | A80Ltt20        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4897          |                        | A80Ltt20        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |               | -62                    |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |               | 62                     | A15Ltt85        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4974          |                        | A15Ltt85        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |               | -187                   |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |               | 187                    | A10Ltt90        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53.5                    | 5050          |                        | A18Ltt82        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |               | -203                   | A18Ltt82        |
| Dep 54              | D    | 55                      |               | 203                    | A18Ltt82        |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5060          |                        | A18Ltt82        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |               | -62                    | A18Ltt82        |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |               | 62                     | A18Ltt82        |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5078          |                        | A10Ltt90        |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5081          |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5620          |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |

|           |   |     |      |  |                 |
|-----------|---|-----|------|--|-----------------|
| G.Cogollo | F | 113 | 5733 |  | A10Lm10Ltt20D60 |
| Basamento | F | 160 | 5935 |  | Arenisca        |

Anexo 4.7: Estratigrafía correspondiente al pozo B4

## Pozo B5

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología    |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A13Lm35Ltt52 |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 3119                     |                        | A30Lm70      |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3856                     |                        | A20Lm5Ltt75  |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 3992                     |                        | A18Lm7Ltt75  |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |              |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A9Lm41Ltt50  |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4258                     |                        | A9Lm41Ltt50  |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4296                     |                        | A9Lm50Ltt41  |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -62                    |              |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 62                     | A75Ltt25     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4329                     |                        | A75Ltt25     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |              |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A43Lm7Ltt50  |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4472                     |                        | A43Lm7Ltt50  |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -125                   |              |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 125                    | A84Lm16      |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4833                     |                        | A84Lm16      |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -249                   |              |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 249                    | A35Ltt65     |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53.5                    | 4850                     |                        |              |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -203                   | A18Ltt82     |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 203                    | A18Ltt82     |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4900                     |                        | A18Ltt82     |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    | A18Ltt82     |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A18Ltt82     |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5269                     |                        | A35Ltt65     |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5276                     |                        | A1Ltt94C5    |

|               |   |     |      |  |                 |
|---------------|---|-----|------|--|-----------------|
| La Luna/Socuy | F | 96  | 5525 |  | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo     | F | 113 | 5617 |  | A10Ltt20C70     |
| Rio Negro     | F | 117 | 5850 |  | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento     | F | 160 | 5866 |  | Arenisca        |

Anexo 4.8: Estratigrafía correspondiente al pozo B5

## Pozo B6

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A14Lm45Ltt41    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1582                     |                        | A43Ltt57        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3078                     |                        | A21Ltt79        |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 3974                     |                        | A22Lm10Ltt68    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4298                     |                        | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4340                     |                        | A9Lm41Ltt50     |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A69Ltt31        |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4375                     |                        | A69Ltt31        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -305                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 305                    | A62Ltt38        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4461                     |                        | A62Ltt38        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 47                     | A64Ltt16        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4762                     |                        | A64Ltt16        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     | A10Lm15Ltt75    |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 4950                     |                        | A10Lm15Ltt75    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -203                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 203                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4960                     |                        | A18Ltt82        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 4963                     |                        | A8Lm10Ltt82     |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 4981                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5704                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5793                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |

|           |   |     |      |             |
|-----------|---|-----|------|-------------|
| Rio Negro | F | 117 | 5981 | A80Lm15Ltt5 |
| Basamento | F | 160 | 5991 | Arenisca    |

Anexo 4.9: Estratigrafía correspondiente al pozo B6

## Pozo B7

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A15Lm47Ltt38    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1582                     |                        | A50Lm10Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 2962                     |                        | A24Lm41Ltt35    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4245                     |                        | A39Lm21Ltt40    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A6Lm24Ltt70     |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4492                     |                        | A6Lm24Ltt70     |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4536                     |                        | A15Lm25Ltt60    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 47                     | A80Ltt20        |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4560                     |                        | A80Ltt20        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A85Ltt15        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4580                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -150                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 150                    | A85Ltt15        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4590                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -112                   |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 112                    | A85Ltt15        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 4600                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -203                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55,5                    |                          | 203                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4648                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     | A35Ltt65        |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 4707                     |                        | A35Ltt65        |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 4724                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5323                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5424                     |                        | A10Lm10Ltt20C60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 5533                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 5574                     |                        | Arenisca        |

|                                                   |
|---------------------------------------------------|
| Anexo 4.10: Estratigrafía correspondiente al pozo |
|---------------------------------------------------|

**Pozo C1**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A7Lm23Ltt70     |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1713                     |                        | A18Lm12Ltt70    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3188                     |                        | A26Lm4Ltt70     |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4447                     |                        | Lm50Ltt50       |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4670                     |                        | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4697                     |                        | Lm50Ltt50       |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 47                     | A88Ltt12        |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4710                     |                        | A88Ltt12        |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -187                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 187                    | A61Lm6Ltt33     |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4738                     |                        | A61Lm6Ltt33     |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -203                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 203                    | A49Ltt51        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 4810                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -112                   | A85Ltt15        |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 112                    |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 4850                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -203                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 203                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 4900                     |                        | A85Ltt15        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 62                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 4951                     |                        | A49Ltt51        |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 4953                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5476                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5576                     |                        | A9Lm11Ltt20D60  |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 5767                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 5782                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.11: Estratigrafía correspondiente al pozo C1

**Pozo C3**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A6Lm30Ltt64     |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1754                     |                        | A21Ltt79        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4000                     |                        | A47Ltt53        |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4962                     |                        | A46Ltt54        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A12Lm33Ltt55    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5189                     |                        | A12Lm33Ltt55    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5229                     |                        | A36Lm16Ltt48    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 47                     | A51Lm9Ltt40     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5254                     |                        | A51Lm9Ltt40     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A68Ltt32        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5305                     |                        | A68Ltt32        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -109                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 109                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5365                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -125                   |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 125                    | A44Ltt56        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5410                     |                        | A10Lm40Ltt20    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5456                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     | A93Lm7          |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5480                     |                        | A93Lm7          |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5546                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6063                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6161                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6373                     |                        | A80Lm15Ltt      |
| Basamento           | F    | 160                     | 6415                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.12: Estratigrafía correspondiente al pozo C3

**Pozo C4**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A6Lm30Ltt64     |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1754                     |                        | A21Ltt79        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4000                     |                        | A47Ltt53        |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4962                     |                        | A46Ltt54        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A12Lm33Ltt55    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5189                     |                        | A12Lm33Ltt55    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5229                     |                        | A36Lm16Ltt48    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 47                     | A51Lm9Ltt40     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5254                     |                        | A51Lm9Ltt40     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A68Ltt32        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5305                     |                        | A68Ltt32        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -109                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 109                    | A82Ltt18        |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5365                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -125                   |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 125                    | A44Ltt56        |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5410                     |                        | A10Lm40Ltt20    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5456                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     | A93Lm7          |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5480                     |                        | A93Lm7          |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5546                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6063                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6161                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6373                     |                        | A80Lm15Ltt      |
| Basamento           | F    | 160                     | 6415                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.13: Estratigrafía correspondiente al pozo C4

**Pozo D2**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A13Lm37Ltt50    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1559                     |                        | A26Lm44Ltt30    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3481                     |                        | A40Lm30Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4721                     |                        | A18Lm32Ltt50    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | A8Lm41Ltt51     |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4971                     |                        | A8Lm41Ltt51     |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5020                     |                        | A9Lm41Ltt70     |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -47                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 47                     | A52Lm13Ltt35    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5029                     |                        | A52Lm13Ltt35    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 156                    | A82Ltt18        |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5052                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -131                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 131                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5181                     |                        | A41Lm19Ltt40    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -171                   |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 171                    | A10Lm40Ltt50    |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5210                     |                        | A10Lm40Ltt20    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5250                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5268                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5295                     |                        | A1Ltt94C5Cr9    |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5690                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5780                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |

|           |   |     |      |  |              |
|-----------|---|-----|------|--|--------------|
| Rio Negro | F | 117 | 6013 |  | A80Lm15Ltt50 |
| Basamento | F | 160 | 6047 |  | Arenisca     |

Anexo 4.14: Estratigrafía correspondiente al pozo D2

### Pozo D3

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A15Lm21Ltt64    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1796                     |                        | A63Ltt57        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3257                     |                        | A40Lm30Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 4607                     |                        | A32Lm30Ltt38    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -62                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 62                     | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 4829                     |                        | Lm50Ltt50       |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 4853                     |                        | Lm50Ltt50       |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A80Lm10Ltt10    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 4872                     |                        | A80Lm10Ltt10    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A84Lm6Ltt10     |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 4958                     |                        | A84Lm6Ltt10     |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -62                    |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 62                     | A10Lm40Ltt50    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5032                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     | A10Lm30Ltt60    |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5079                     |                        | A10Lm30Ltt60    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    | A10Lm20Ltt70    |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5180                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5190                     |                        | A10Lm20Ltt70    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5231                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 5620                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 5733                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 5907                     |                        | A80Lm15Ltt5     |

|           |   |     |      |          |
|-----------|---|-----|------|----------|
| Basamento | F | 160 | 5935 | Arenisca |
|-----------|---|-----|------|----------|

Anexo 4.15: Estratigrafía correspondiente al pozo D3

## Pozo E1

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A71Ltt29        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1695                     |                        | A66Ltt34        |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3844                     |                        | A71Lm19Ltt10    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 5038                     |                        | A56Ltt44        |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A86Lm9Ltt5      |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5470                     |                        | A86Lm9Ltt5      |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5473                     |                        | A84Lm10Ltt6     |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A79Lm10Ltt11    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5488                     |                        | A79Lm10Ltt11    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A10Lm20Ltt70    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5500                     |                        | A82Ltt18        |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          |                        |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          |                        |                 |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5580                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5590                     |                        | A10Lm30Ltt60    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          |                        |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          |                        |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5610                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          |                        |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          |                        |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5620                     |                        | A10Lm20Ltt70    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5673                     |                        | A1Ltt94C4       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6266                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6384                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6660                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 6675                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.16: Estratigrafía correspondiente al pozo

**Pozo E3**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A27Lm10Ltt63    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 2949                     |                        | A45Lm14Ltt41    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4099                     |                        | A50Lm18Ltt32    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 5317                     |                        | A48Lm20Ltt32    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm25Ltt60    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5682                     |                        | A15Lm25Ltt60    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5733                     |                        | A34Lm16Ltt50    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A80Lm10Ltt10    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5750                     |                        | A80Lm10Ltt10    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -358                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 358                    | A31Lm19Ltt50    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5806                     |                        | A31Lm19Ltt50    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      | 5850                     | 156                    | A24Lm26Ltt50    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    |                          |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5890                     |                        | A10Lm30Ltt60    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -187                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 187                    | A10Lm70Ltt20    |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5900                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          |                        |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          |                        |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5979                     |                        | A10Lm70Ltt20    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5988                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6079                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6178                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |

|           |   |     |      |             |
|-----------|---|-----|------|-------------|
| Rio Negro | F | 117 | 6453 | A80Lm15ltt5 |
| Basamento | F | 160 | 6499 | Arenisca    |

Anexo 4.17: Estratigrafía correspondiente al pozo E3

## Pozo E4

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A40Lm35ltt25    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1705                     |                        | A30Lm70         |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 3915                     |                        | A28Lm72         |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 5181                     |                        | A19Lm81         |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -47                    | A11Lm89         |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 47                     | A11Lm89         |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5558                     |                        | A11Lm89         |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5613                     |                        | Lm50Ltt50       |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -94                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 94                     | A49Lm51         |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5627                     |                        | A49Lm51         |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -312                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 312                    | A31Lm69         |
| Misoa Superior      | E    | 43,5                    | 5630                     |                        | A31Lm19Ltt50    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          |                        |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          |                        |                 |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5650                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5684                     |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 156                    | A35Ltt30C35     |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5700                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          |                        |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          |                        |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5755                     |                        | A35Ltt30C35     |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5851                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6460                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6557                     |                        | A10Ltt20C70     |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6767                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 6783                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.18: Estratigrafía correspondiente al pozo

**Pozo E5**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 1799                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4027                     |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 5154                     |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 5562                     |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 5594                     |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 5610                     |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 5732                     |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 5750                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 5790                     |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          |                        |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          |                        |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 5800                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          |                        |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          |                        |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 5805                     |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 5814                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 6425                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 6540                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 6852                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 6868                     |                        | Arenisca        |

# Anexo 4.19: Estratigrafía correspondiente al pozo

## Pozo BESE

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor Erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 3429                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 6234                     |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 6546                     |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 7170                     |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 7357                     |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 7668                     |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 7687                     |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 7749                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 7762                     |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 7793                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 7805                     |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 7855                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 8416                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 8541                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 8603                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 8884                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.20: Estratigrafía correspondiente al pozo

**Pozo FDFN89C45**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 4988                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 8105                     |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 8728                     |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 9352                     |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 9507                     |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 9819                     |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 9838                     |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 9906                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 9916                     |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 9935                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 9944                     |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 10006                    |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 10567                    |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 10692                    |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 10910                    |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 10941                    |                        | Arenisca        |

Anexo 4.21: Estratigrafía correspondiente al pozo

**Pozo Foredeep**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 4988                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 8728                     |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 10287                    |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 10443                    |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 10599                    |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 10910                    |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 10926                    |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 11113                    |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 11128                    |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 11150                    |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 11160                    |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 11213                    |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 11253                    |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 11347                    |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 11534                    |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 11565                    |                        | Arenisca        |

Anexo 4.22: Estratigrafía correspondiente al pozo Foredeep

**Pozo D1**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 3117                     |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 5923                     |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 6546                     |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 6702                     |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 6858                     |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 7170                     |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 7232                     |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 7325                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 7350                     |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 7372                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 7394                     |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 7450                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 8074                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 8167                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 8416                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 8479                     |                        | Arenisca        |

Anexo 4.23: Estratigrafía correspondiente al pozo D1

**Pozo FDRT**

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Top Depth (ft) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        | 0              |                        | A30Ltt70        |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 3500                     |                |                        | A40Lm20Ltt40    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 5500                     |                |                        | A50Lm20Ltt30    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 6500                     |                |                        | A49Lm9Ltt42     |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          |                | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          |                | 31                     | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 9227                     | 29600          |                        | A15Lm20Ltt65    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 9383                     | 30100          |                        | A35Lm25Ltt40    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          |                | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          |                | 31                     | A74Lm6Ltt20     |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 9695                     | 31100          |                        | A74Lm6Ltt20     |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          |                | -405                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          |                | 405                    | A31Lm53Ltt16    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 9710                     | 31150          |                        | A31Lm53Ltt16    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          |                | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          |                | 156                    | A41Lm19Ltt40    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 9788                     | 31400          |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          |                | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          |                | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 9804                     | 31450          |                        | A31Lm69         |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          |                | -140                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          |                | 140                    |                 |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 9822                     | 31510          |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          |                | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          |                | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 9832                     | 31540          |                        | A41Lm19Ltt40    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 9882                     | 31700          |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 10287                    | 33000          |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 10411                    | 33400          |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 10661                    | 34200          |                        | A80Lm15Ltt5     |

|           |   |     |       |       |          |
|-----------|---|-----|-------|-------|----------|
| Basamento | F | 160 | 10676 | 34250 | Arenisca |
|-----------|---|-----|-------|-------|----------|

Anexo 4.24: Estratigrafía correspondiente al pozo FDRT

## Pozo E71

| Formación o evento  | Tipo | Edad del comienzo (M.a) | Profundidad del tope (m) | Espesor erosionado (m) | Litología       |
|---------------------|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Onia-Reciente       | F    | 5,2                     | 0                        |                        | A27Lm10Ltt63    |
| La Puerta           | F    | 10,2                    | 2805                     |                        | A45Lm14Ltt41    |
| Lagunillas          | F    | 15                      | 4676                     |                        | A50Lm18Ltt32    |
| Lagunillas Inferior | F    | 16                      | 5923                     |                        | A48Lm20Ltt32    |
| SB 16.5 Disc        | E    | 16,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 16.5            | D    | 17                      |                          | 31                     | A15Lm25Ltt60    |
| La Rosa Superior    | F    | 21                      | 6858                     |                        | A15Lm25Ltt60    |
| La Rosa Inferior    | F    | 24,8                    | 7014                     |                        | A34Lm16Ltt50    |
| SB 26 Disc          | E    | 25                      |                          | -31                    |                 |
| Dep 26              | D    | 26                      |                          | 31                     | A80Lm10Ltt10    |
| Oligoceno           | F    | 35                      | 7325                     |                        | A80Lm10Ltt10    |
| SB 36 Disc          | E    | 36                      |                          | -358                   |                 |
| Dep 36              | D    | 37,5                    |                          | 358                    | A31Lm19Ltt50    |
| Misoa Superior      | F    | 43,5                    | 7350                     |                        | A31Lm19Ltt50    |
| SB 44 Disc          | E    | 44                      |                          | -156                   |                 |
| Dep 44              | D    | 45                      |                          | 156                    | A24Lm26Ltt50    |
| Misoa Inferior 3    | F    | 50,5                    | 7425                     |                        | A10Lm40Ltt50    |
| SB 51.5 Disc        | E    | 51,5                    |                          | -94                    |                 |
| Dep 51.5            | D    | 52,5                    |                          | 94                     |                 |
| Misoa Inferior 2    | F    | 53,5                    | 7438                     |                        | A10Lm30Ltt60    |
| SB 54 Disc          | E    | 54                      |                          | -187                   |                 |
| Dep 54              | D    | 55                      |                          | 187                    | A10Lm70Ltt20    |
| Misoa Inferior 1    | F    | 58                      | 7456                     |                        | A44Ltt56        |
| SB 58 Disc          | E    | 58,5                    |                          | -31                    |                 |
| Dep 58              | D    | 60,5                    |                          | 31                     |                 |
| Paleoceno           | F    | 64                      | 7469                     |                        | A10Lm70Ltt20    |
| Colon/Mito Juan     | F    | 79                      | 7512                     |                        | A1Ltt94C5       |
| La Luna/Socuy       | F    | 96                      | 7949                     |                        | Lm25Ltt5C60Cr10 |
| G.Cogollo           | F    | 113                     | 8074                     |                        | A10Lm10Ltt20D60 |
| Rio Negro           | F    | 117                     | 8261                     |                        | A80Lm15Ltt5     |
| Basamento           | F    | 160                     | 8276                     |                        | Arenisca        |

|                                                       |
|-------------------------------------------------------|
| Anexo 4.25: Estratigrafía correspondiente al pozo E71 |
|-------------------------------------------------------|

**Medidas de madurez**

| A1 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 3429            | 0,36 |
|    | 3554            | 0,31 |
|    | 3897            | 0,46 |
|    | 4333            | 0,61 |
|    | 4395            | 0,81 |
|    | 4863            | 0,72 |
|    | 5440            | 0,97 |

**Anexo 5.1: Medidas de madurez del pozo A1**

| A2 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4339            | 0,53 |
|    | 4349            | 0,54 |
|    | 4539            | 0,56 |
|    | 4693            | 0,53 |

### Anexo 5.2: Medidas de madurez del pozo A2

| A4 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 3834            | 0,63 |
|    | 3956            | 0,57 |
|    | 3974            | 0,58 |
|    | 3984            | 0,61 |
|    | 4349            | 0,6  |
|    | 4405            | 0,54 |
|    | 4470            | 0,52 |
|    | 4479            | 0,63 |
|    | 4545            | 0,57 |
|    | 4713            | 0,64 |
|    | 4825            | 0,62 |
|    | 4835            | 0,59 |

### Anexo 5.3: Medidas de madurez del pozo A4

| B1 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4551            | 0,48 |
|    | 4638            | 0,58 |
|    | 4688            | 0,56 |

|  |      |      |
|--|------|------|
|  | 4744 | 0,56 |
|  | 4869 | 0,56 |
|  | 4882 | 0,56 |
|  | 4906 | 0,52 |

Anexo 5.4: Medidas de madurez del pozo B1

| B4 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4856            | 0,47 |
|    | 4887            | 0,45 |
|    | 5012            | 0,61 |
|    | 5044            | 0,56 |
|    | 5081            | 0,6  |
|    | 5137            | 0,56 |
|    | 5573            | 0,92 |
|    | 5639            | 0,81 |
|    | 5670            | 1,03 |
|    | 5704            | 0,73 |
|    | 5720            | 1,17 |

Anexo 5.5: Medidas de madurez del pozo B4

| B5 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4161            | 0,3  |
|    | 4342            | 0,28 |
|    | 4386            | 0,31 |
|    | 4710            | 0,36 |
|    | 4832            | 0,34 |
|    | 4991            | 0,36 |
|    | 5109            | 0,41 |
|    | 5150            | 0,35 |
|    | 5171            | 0,43 |
|    | 5268            | 0,38 |
|    | 5299            | 0,52 |
|    | 5483            | 0,63 |
|    | 5549            | 0,52 |
|    | 5580            | 0,66 |
|    | 5614            | 0,63 |

### Anexo 5.6: Medidas de madurez del pozo B5

| B6 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4364            | 0,48 |
|    | 4551            | 0,5  |
|    | 4863            | 0,52 |
|    | 5019            | 0,52 |

### Anexo 5.7: Medidas de madurez del pozo B6

| B7 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4613            | 0,38 |
|    | 4676            | 0,42 |
|    | 4707            | 0,47 |
|    | 4738            | 0,56 |
|    | 4832            | 0,52 |
|    | 4863            | 0,54 |
|    | 5143            | 0,62 |
|    | 5296            | 0,69 |
|    | 5330            | 0,64 |
|    | 5393            | 0,93 |
|    | 5547            | 0,65 |

### Anexo 5.8: Medidas de madurez del pozo B7

| D3 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4545            | 0,52 |
|    | 4607            | 0,58 |
|    | 4825            | 0,53 |

### Anexo 5.9: Medidas de madurez del pozo D3

| C1 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 4705            | 0,27 |
|    | 4928            | 0,31 |
|    | 4988            | 0,33 |
|    | 5455            | 0,77 |
|    | 5549            | 0,82 |
|    | 5577            | 0,78 |
|    | 5611            | 1,04 |
|    | 5704            | 1,2  |
|    | 5723            | 1,51 |

### Anexo 5.10: Medidas de madurez del pozo C1

| E1 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 5084            | 0,55 |
|    | 5140            | 0,55 |
|    | 5221            | 0,6  |

### Anexo 5.11: Medidas de madurez del pozo E1

| E4 | Profundidad (m) | %Ro  |
|----|-----------------|------|
|    | 5464            | 0,57 |
|    | 5475            | 0,55 |
|    | 5694            | 0,68 |
|    | 5729            | 0,62 |

### Anexo 5.12: Medidas de madurez del pozo E4