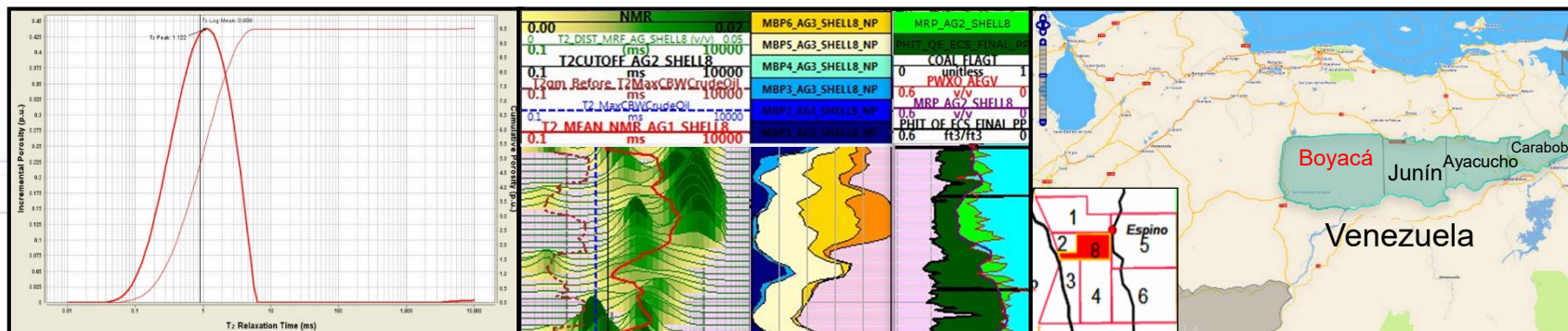




“INTEGRACIÓN DE REGISTROS DE RMN Y DIELECTRICOS CON ANÁLISIS ESPECIALES DE NÚCLEOS, EN LA CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS DE CRUDO EXTRA-PESADO, CASO DE ESTUDIO EN BLOQUE-8, ÁREA BOYACÁ, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO, VENEZUELA”

Autores:

MSc. Andrés E. Guzmán V.
MSc. Martín H. Jordán V.

Co-Autor:

PhD. Gerardo Jaimes

Noviembre, 2019



INTRODUCCIÓN

- Los yacimientos de edad Oligoceno y Cretácico del Bloque 8 de Boyacá presentan un gran potencial volumétrico con alta saturación de Crudo Extrapesado, sin embargo, ninguno de los resultados de producción “en frío” ha sido satisfactorio.
- Las formaciones no aportaron ningún tipo de fluidos o sólo produjeron 100%AyS. Esto se relaciona con el hecho de que el petróleo en este Bloque, tiene una viscosidad sumamente alta ($>80.000\text{cp}$ @ $T_f=114^\circ\text{F}$), lo cual supone una baja movilidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL

No se había estudiado localmente el nivel de variabilidad vertical y areal de las propiedades dinámicas del crudo, y no se tenía idea de si existía alguna zona donde las mismas sí fuesen lo suficientemente aptas para el desplazamiento del crudo.

Por lo tanto, se requirió diseñar una metodología que contribuya a evaluar la prospectividad de cada horizonte, a partir de la integración de los registros de RMN y Dieléctricos, a su vez apoyados en los ensayos experimentales de laboratorio.

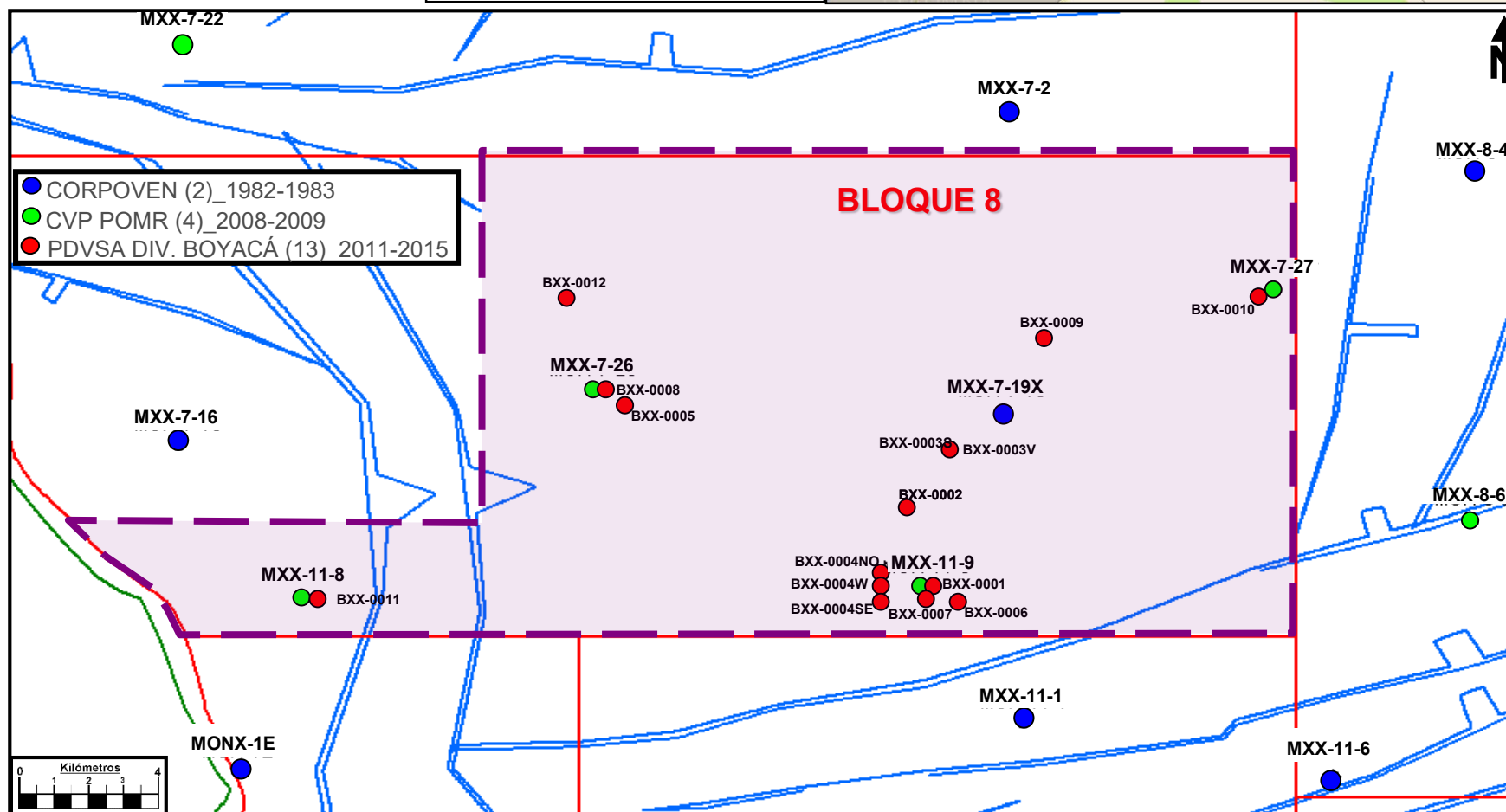
Este proyecto ha servido de herramienta para evaluar con mayor certeza cuáles intervalos son los más apropiados para la completación de estos pozos, generando así nuevas oportunidades de explotación.



DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

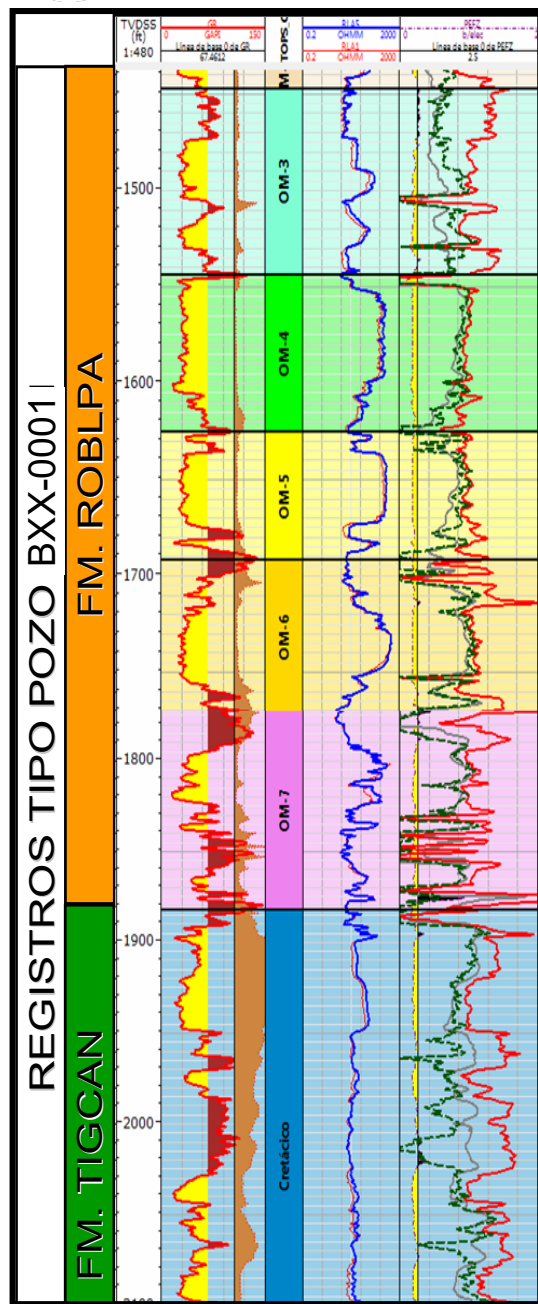
Datos Oficiales del Bloque	
Área	358 Km ²
#Pozos	17
Porosidad	28,50%
Permeabilidad	1-20 Darcies
°API	05-12°API

Datos Oficiales del Bloque	
POES	39,29 MMBBNP
Fr. Primario	4,61%
Fr. Secundario	9,32%
Res. Primarias	1,81 MMBBNP
Res. Secundarias	3,64 MMBBNP
Res. Totales	5,45 MMBBNP





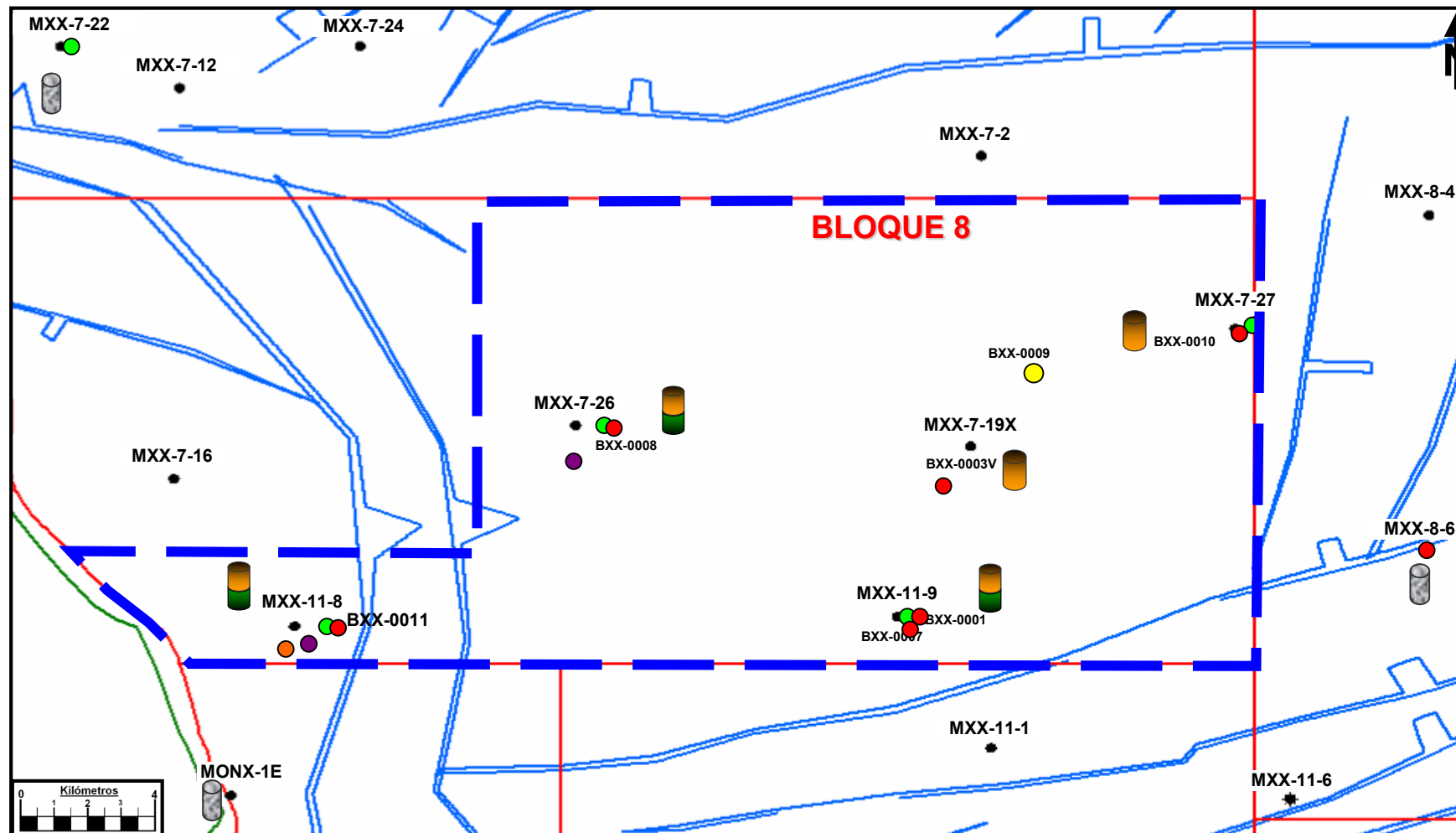
MARCO ESTRATIGRÁFICO Y TECTÓNICO REGIONAL



Edad	Formación	Registro Tipo MCH-7-26	Litología
MIOCENO	CHAGUARAMAS		Alternancias de conglomerados, arenas, arcillitas y lignitos
OLIGOCENO	ROBLECITO ?		lutitas y areniscas de grano medio a fino con intercalaciones de arcillitas gris verdosas ligeramente valcareas, con trazas de lignitos
	LA PASCUA		Areniscas y lutitas oscuras y algunos lignitos
	TIGRE		De espesor muy variable, Arenas de variado espesores intercalados con sedimentos finos, areniscas, margas, calizas delgadas y lutitas negras carbonáceas.
	CANOA		Areniscas conglomeráticas, limolitas y arcillitas generalmente moteadas
PRE-CRETÁCICO	IPIRE		Areniscas cuazo cristalinas, de color beige a rojizo, el tamaño de grano puede variar de grano grueso a muy fino, ocasional cemento calcareo y/o matriz arcillosa
	CARRIZAL		Arcillitas verdosas a gris oscuro, duras, masivas y densas, contiene algunas capas de limolitas y areniscas



INFORMACIÓN DISPONIBLE EN BLOQUE 8 ÁREA BOYACÁ



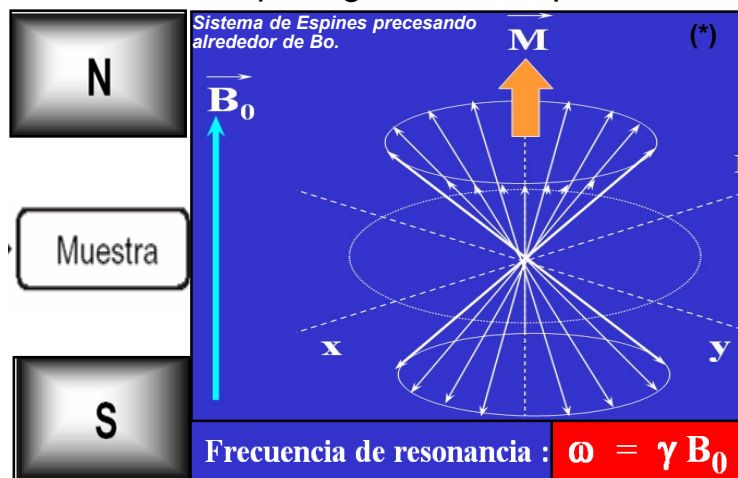
- 4 POZOS SÓLO CON REGISTRO DE RMN
- 1 POZO SÓLO CON REGISTRO DIELÉCTRICO
- 6 POZOS CON AMBOS REGISTROS: DE RMN Y REG. DIELÉCTRICO
- 2 ANÁLISIS DE VISCOSIDAD DE CRUDO MUERTO
- 1 ANÁLISIS DE VISCOS. DE CRUDO VIVO Y 1 ANÁLISIS PVT VÁLIDO.

- 2 POZOS CON NÚCLEO SÓLO A NIVEL DEL OLIGOCENO
- 3 POZOS CON NÚCLEO A NIVEL DEL OLIGOCENO y CRÉTÁCICO.

PRINCIPIOS FÍSICOS DEL RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN)

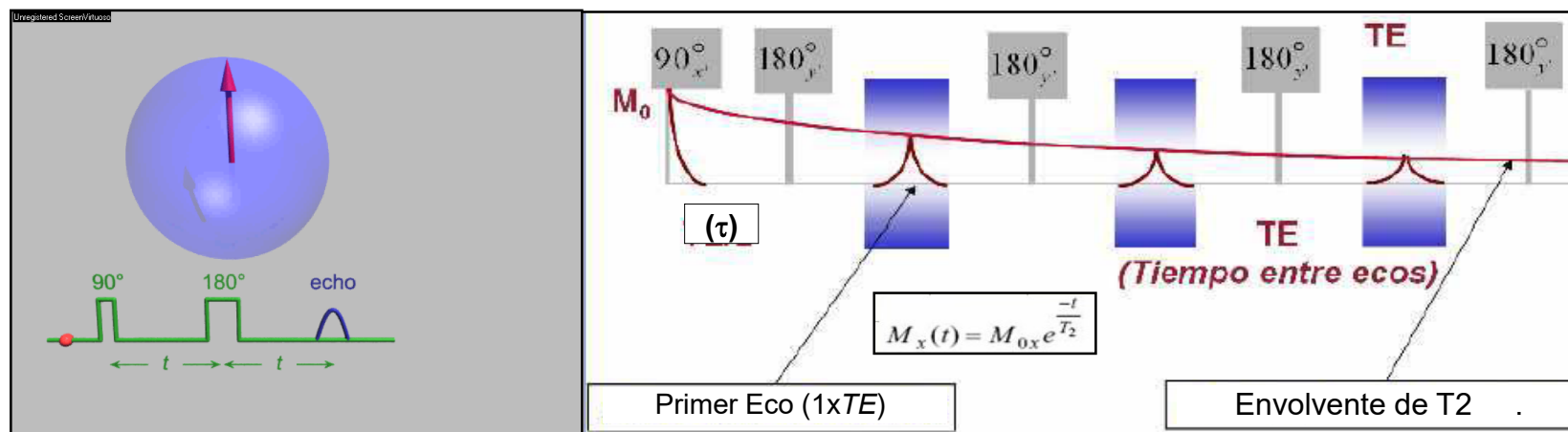
Un equipo RMN

Se compone de un imán externo para polarizar los núcleos y un emisor/receptor de radiofrecuencias para generar una perturbación.



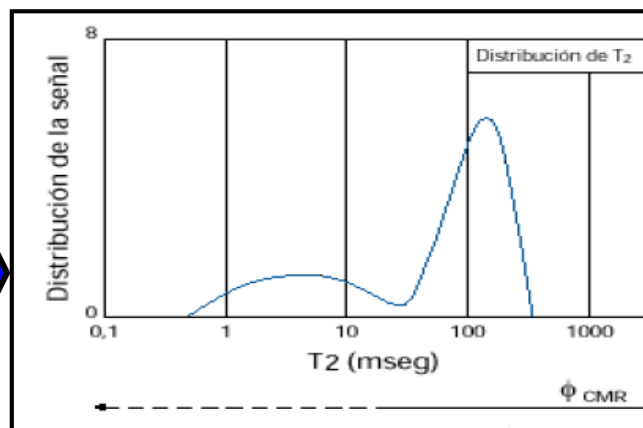
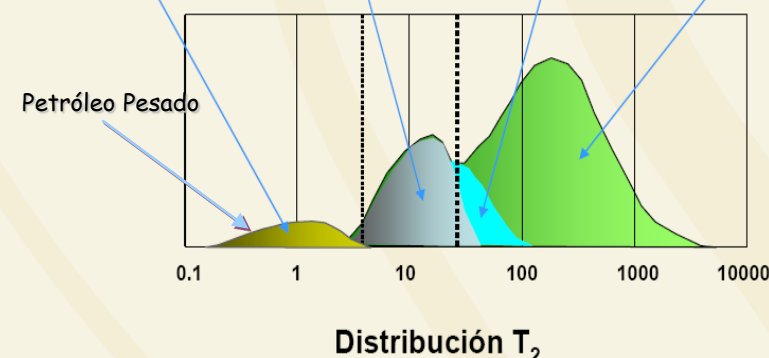
Relajación Transversal (T_2)

Luego de la Polarización producida por el campo magnético (TW, T_1), se aplica una secuencia de pulsos de radiofrecuencias CPMG, para registrar un tren de ecos cuya envolvente es el tiempo de decaimiento de constante T_2 .

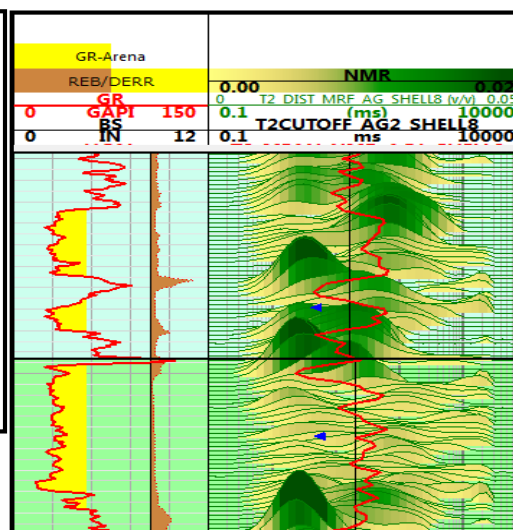


El tiempo de decaimiento de T_2 , es proporcional al tamaño de poro e intrínseco a los tipos de fluidos coexistiendo en la roca.

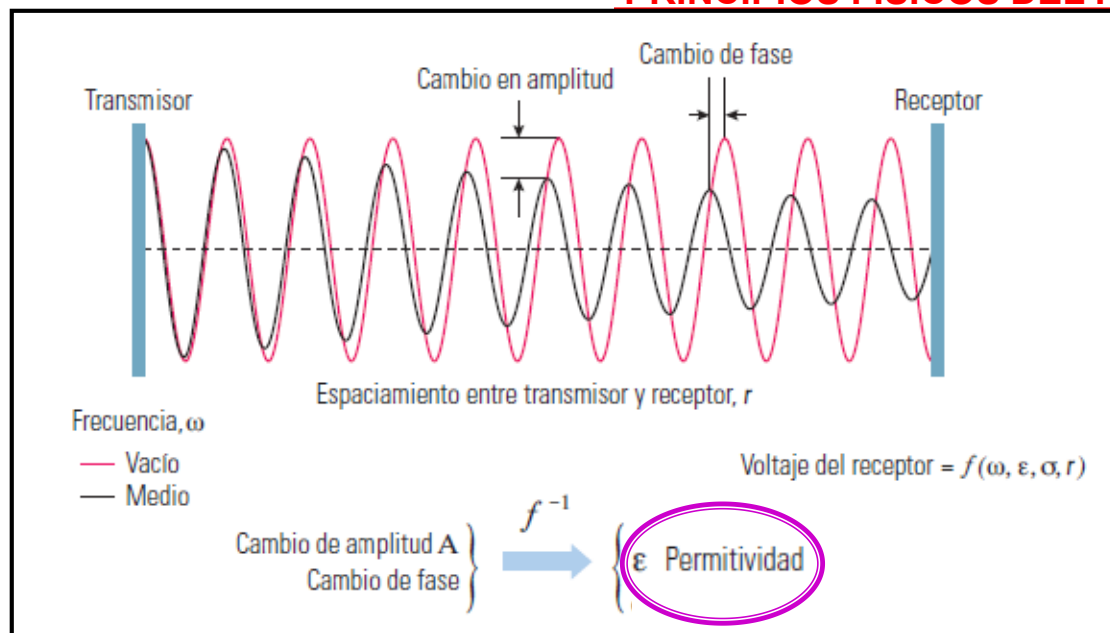
Agua Adherida A las Arcillas, Agua Adherida Capilar, Agua Móvil, Petróleo Móvil



Tomado de Libro "NMR Logging Principles and Applications" Coates-Xiao, 1999



PRINCIPIOS FISICOS DEL REGISTRO DIELECTRICO



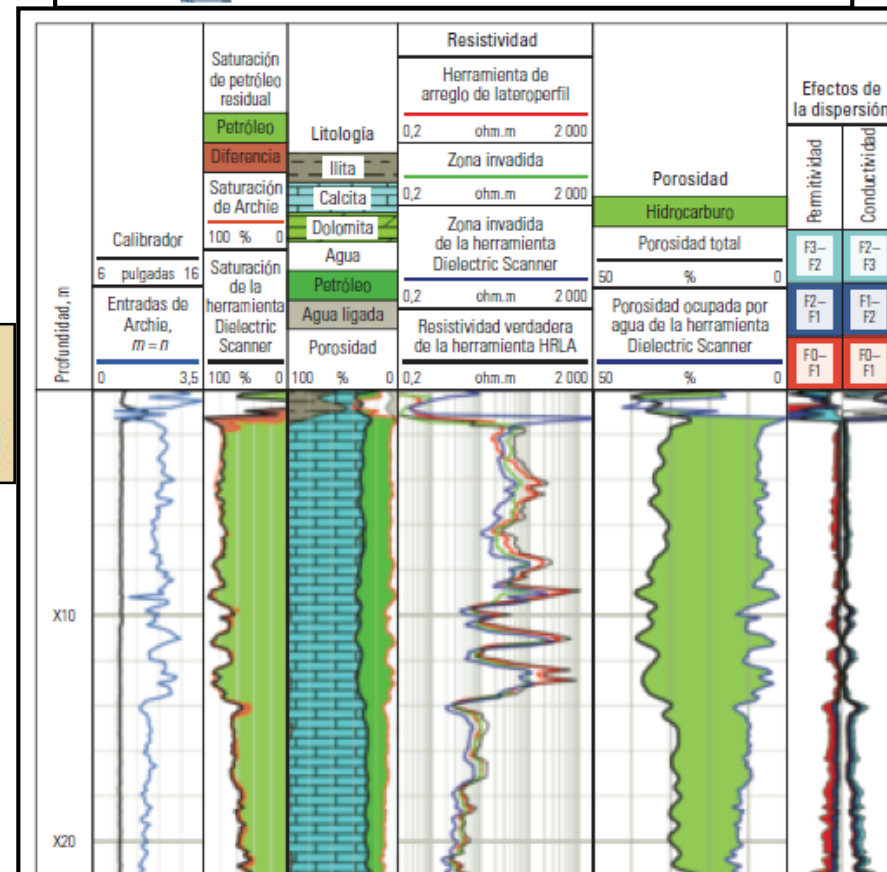
Minerales, rocas, fluidos	Constante dieléctrica relativa (relativa al vacío)
Anhidrita	6,35
Yeso	4,16
Petróleo	2,0 a 2,4
Gas	1,0
Arenisca	4,65
Dolomía	6,8
Caliza	7,5 a 9,2
Lutita	5 a 25
Coloides secos	5,76
Agua dulce	78,3
Agua	56 a 80

^ Constantes dieléctricas de los minerales, rocas y fluidos más comunes.

Método CRI

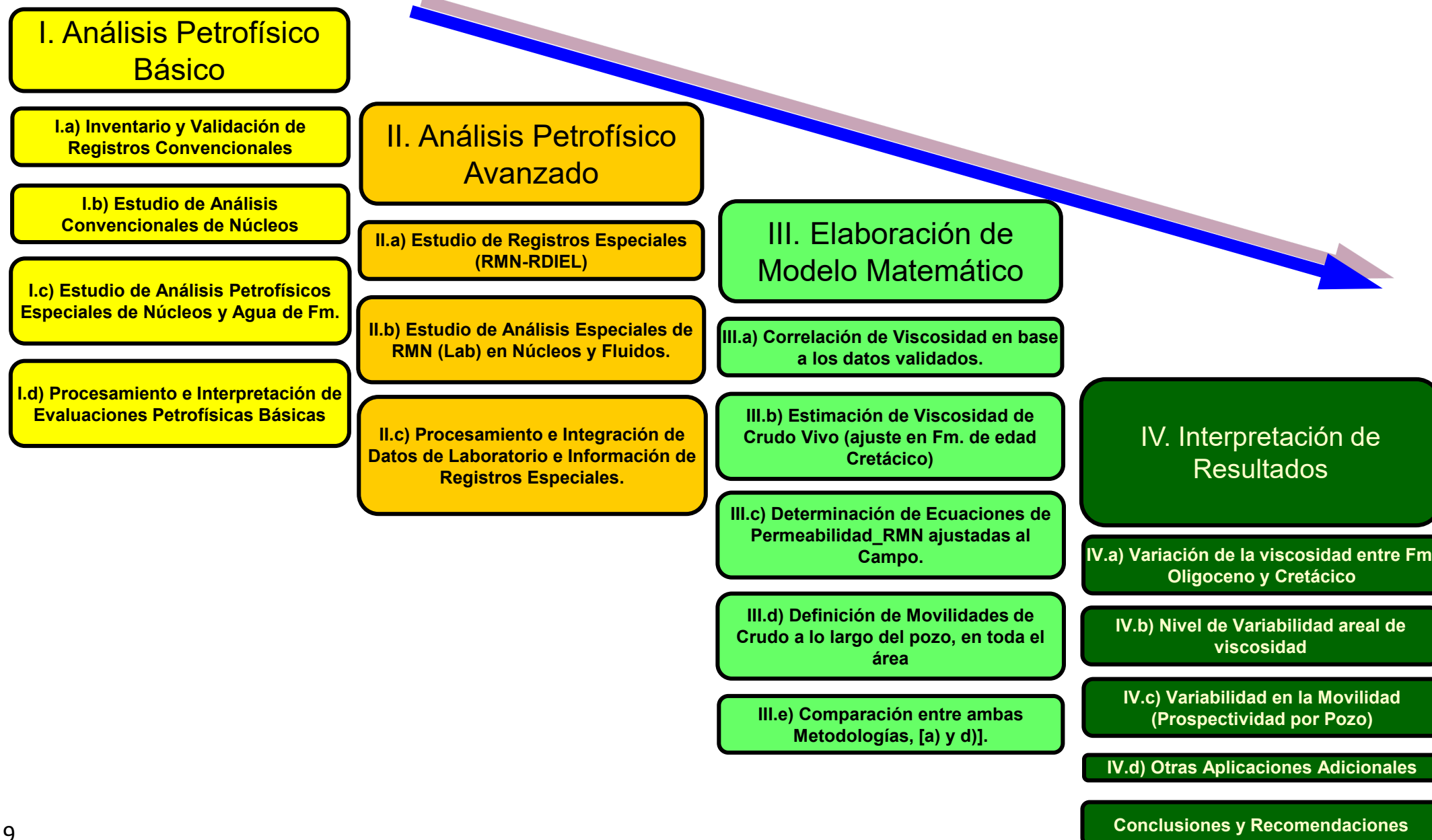
$$\sqrt{\epsilon^*} = (1 - \phi_T) \sqrt{\epsilon_m} + \phi_T \sqrt{\epsilon_w} + (1 - S_W) \sqrt{\epsilon_{oil}}$$

ϵ^* = permitividad dieléctrica
 ϵ_m = permitividad de la matriz
 ϵ_w^* = permitividad del agua
 ϵ_{oil} = permitividad del hidrocarburo
 S_W = saturación de agua
 ϕ_T = porosidad total



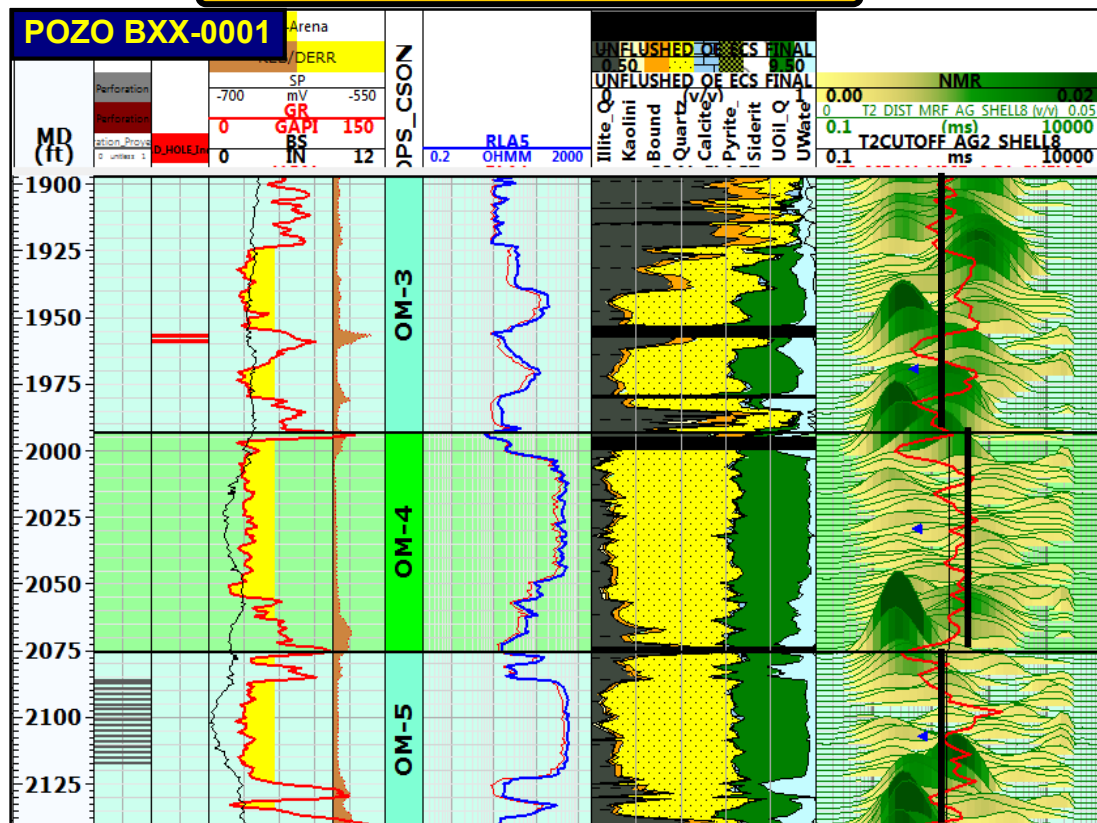


METODOLOGÍA APLICADA

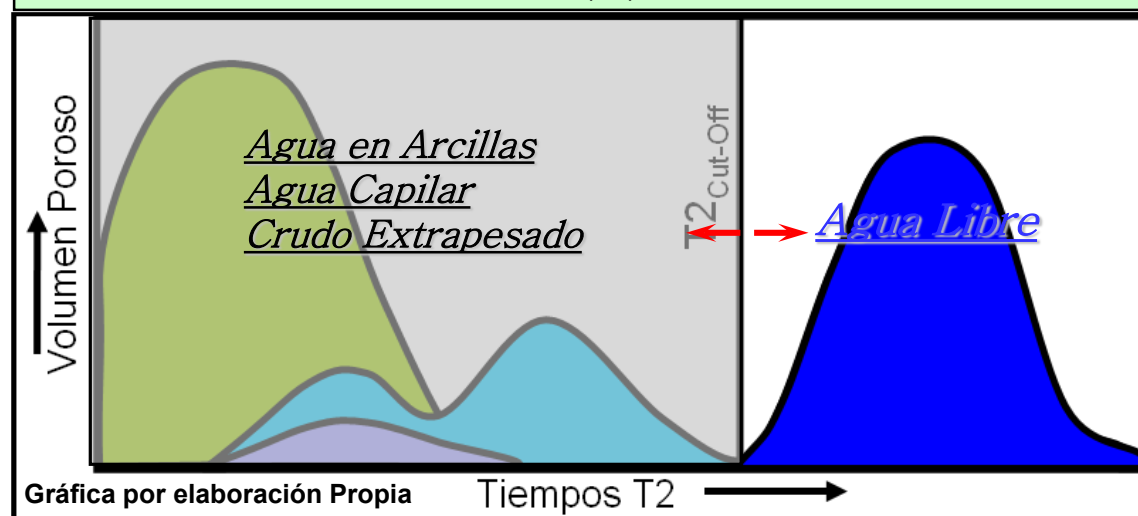
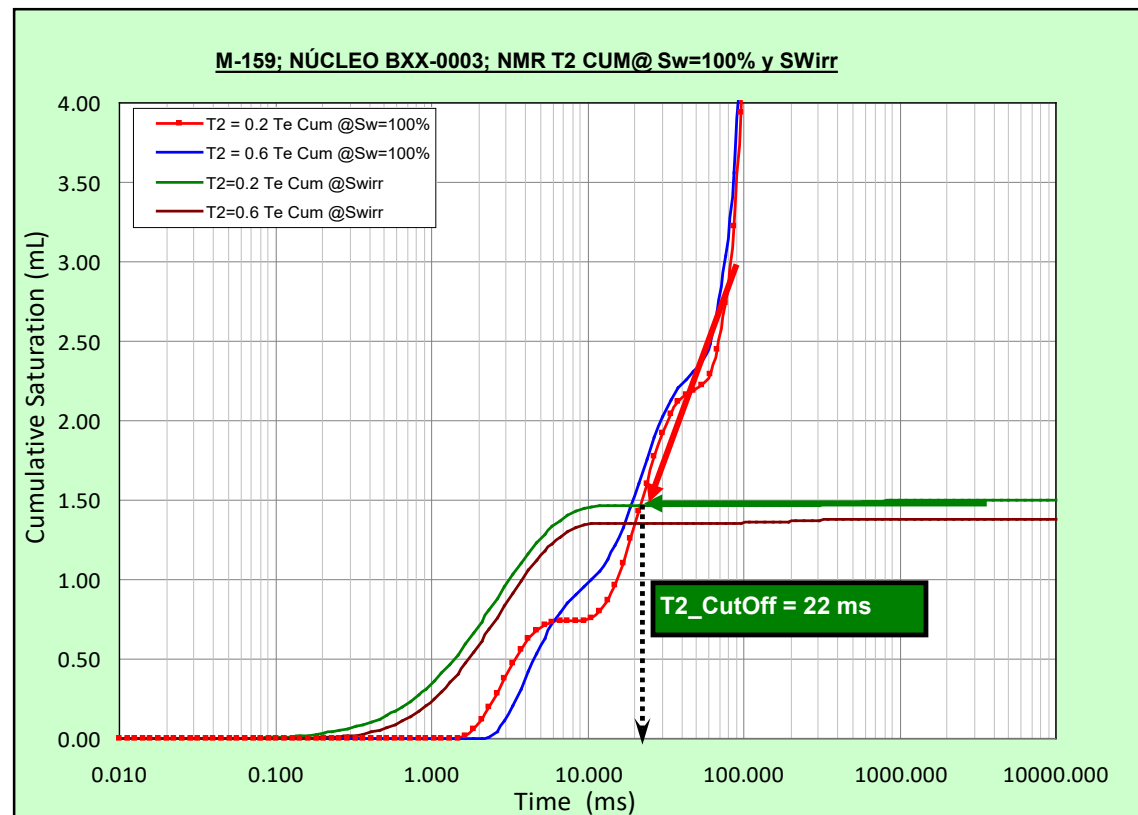




II.a) Estudio de Registros Especiales (RMN-RDiel)



CICLO/FM.	PROPIEDAD			
	Porosity (%) Te=0.2	Swirr @ TE=0.2ms	Swirr @ TE=0.6ms	T2-CutOff, TE=0.2 ms
PROMEDIO OM-3	28.34	12.68	12.36	16.59
PROMEDIO OM-4	34.65	5.69	5.04	20.73
PROMEDIO OM-5	31.82	8.52	8.02	18.35
PROMEDIO OM-6	30.91	11.54	11.48	25.96
PROMEDIO OM-7	30.90	18.49	19.00	8.05
PROMEDIO CRET.	29.90	17.50	17.68	44.50



✓ En este estudio, se ajustó un T2_Cutoff promedio para cada Ciclo/Fm, a partir de ensayos directos realizados a muestras de núcleos.

10

II.a) Estudio de Registros Especiales (RMN-RDiel)

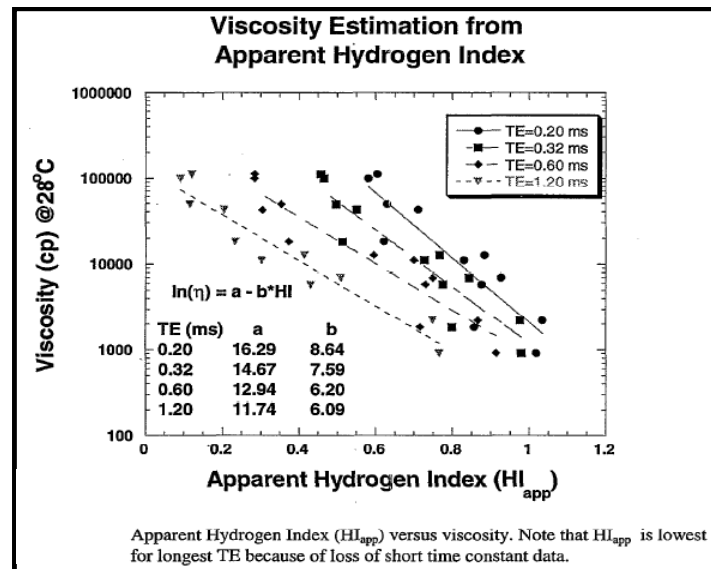
Definición de Índice de Hidrógeno Aparente (HI_{app})

La diferencia entre la porosidad real y la estimada por la herramienta de RMN es:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_{NMR} = (1 - HI_{app})S_o\phi.$$

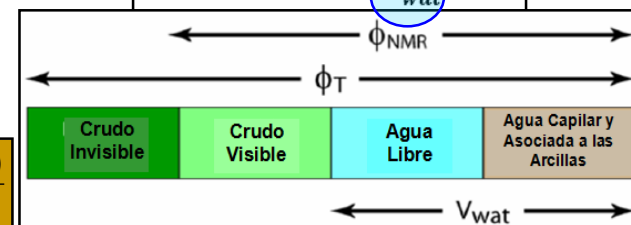
$$HI_{app} = \frac{S_o\phi - \Delta\phi}{S_o\phi}$$

Tomado de La Torraca, 1999



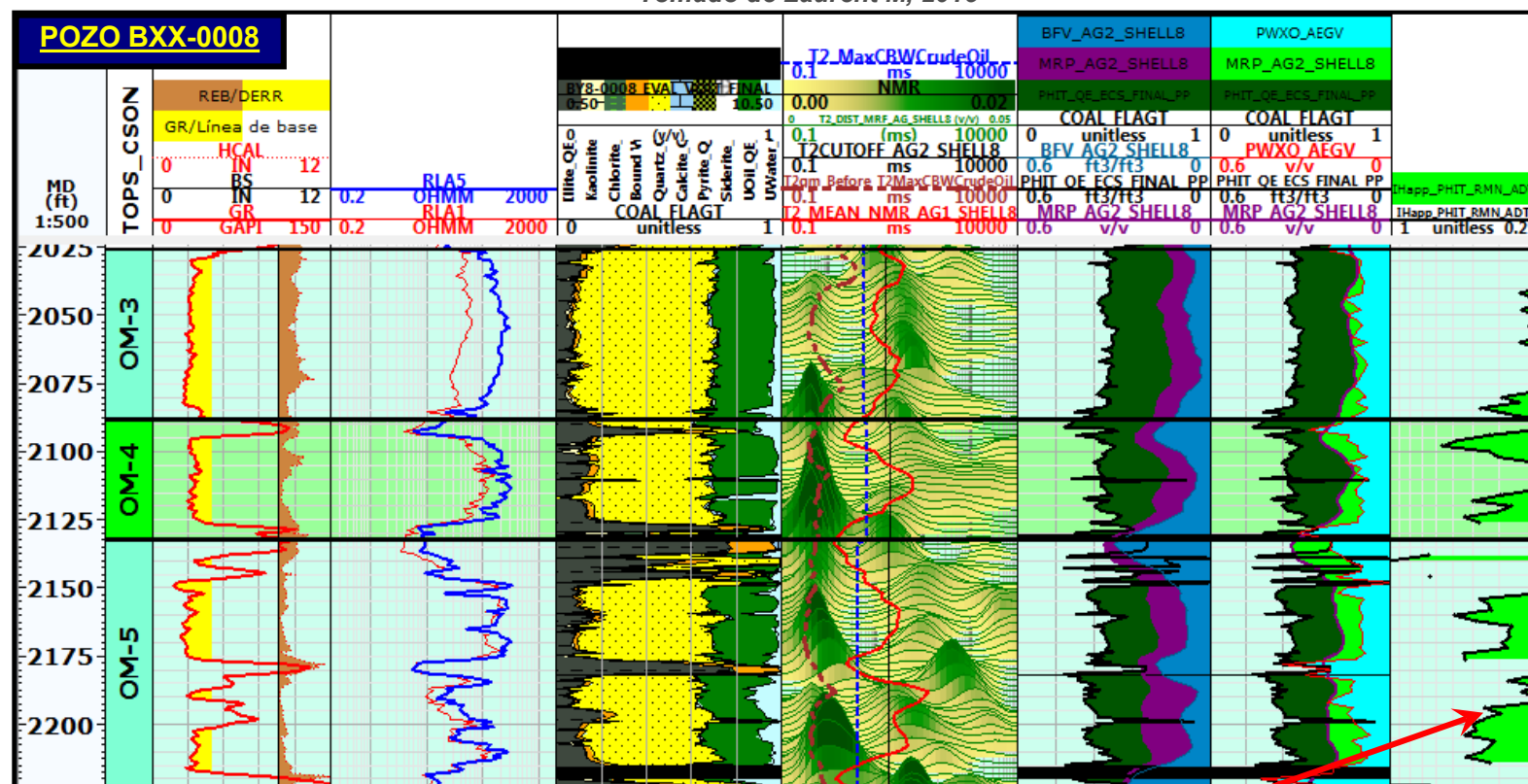
*Tomado directamente de La
Torraca, Paper publicado en 1999*

$$HI_{app} = \frac{\Phi_{NMR} - v_{wat}}{\Phi_T - v_{wat}}$$



$$HI_{app} = \frac{(\phi_{RMN} - \phi_{WDE})}{(\phi_T - \phi_{WDE})}$$

Tomado de Laurent M, 2015



Calculo de Índice de Hidrógeno Aparente, a partir de registros de pozos (Hlapp Reg)

II.b) Estudio de Análisis Especiales de RMN (Lab) en Núcleos y Fluidos.

Ensayos en 37 tapones de núcleo impregnados

Pruebas de T2 en
Tapones Originales

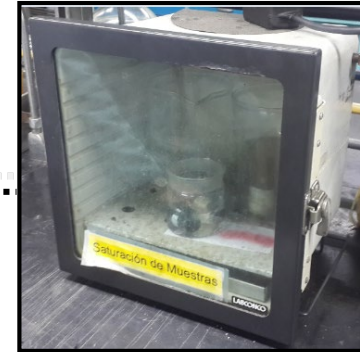
Datos Obtenidos: Índice de Hidrógeno, $T2LM_{CRUDO}$ y $T1LM_{CRUDO}$



Ensayos en 25 tapones de núcleo embebidos en agua

Pruebas de T2 en
Tapones en Imbibición

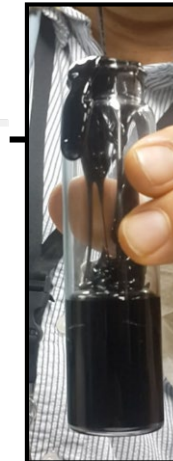
Datos Obtenidos: Verificar umbrales entre crudo pesado y agua irreducible.



Ensayos en Muestras de Crudo. Pozo BXX-0011 (Cretácico)

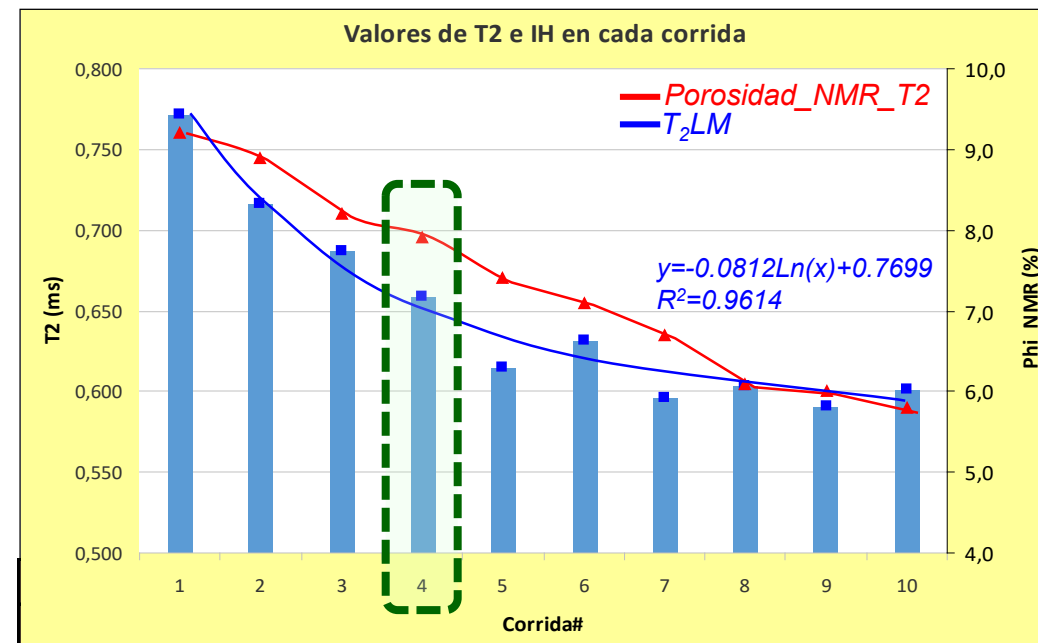
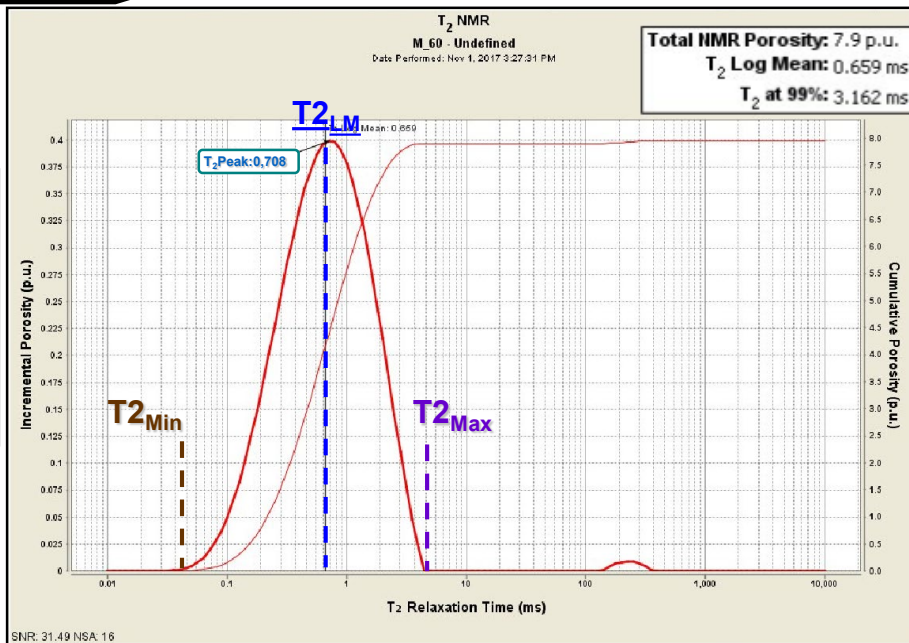
Pruebas RMN en
Volumen de Crudo
disponible

Datos Obtenidos: Índice de Hidrógeno, $T2LM_{CRUDO}$ y $T1LM_{CRUDO}$



Pruebas de T2 en
Tapones Originales

II.b) Estudio de Análisis Especiales de RMN (Lab) en Núcleos y Fluidos.



Temp. Inicial (°C): 55

Temp. Final (°C): 31,5

Temp. Prueba (°C): T.Fm. 45,6



CORRIDAS	T2 Log Mean (ms)	T2 Peak (ms)	PhiT_NMR (%)
1	0,772	0,891	9,2
2	0,716	0,891	8,9
3	0,687	0,794	7,8
4	0,659	0,708	7,9
5	0,615	0,708	7,4
6	0,632	0,708	7,1
7	0,596	0,708	6,7
8	0,603	0,631	6,1
9	0,591	0,631	6,0
10	0,601	0,708	5,8

$$IH_{app_Plug} \approx \frac{\phi_{T(An.Especial.NMR)}}{So_{(An.Conv.Plug)} * \phi_{T(An.Conv.Plug)}}$$

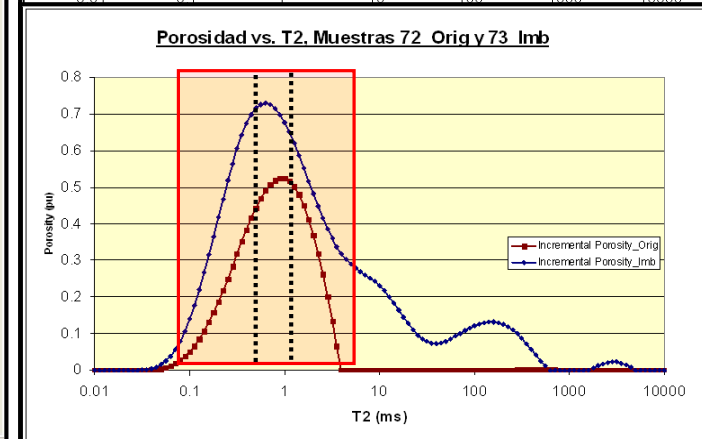
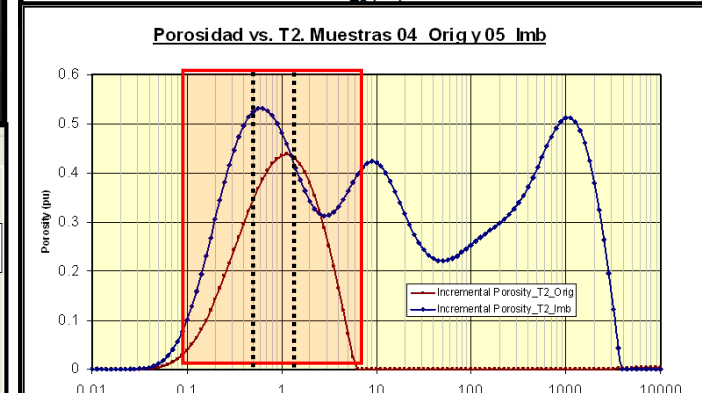
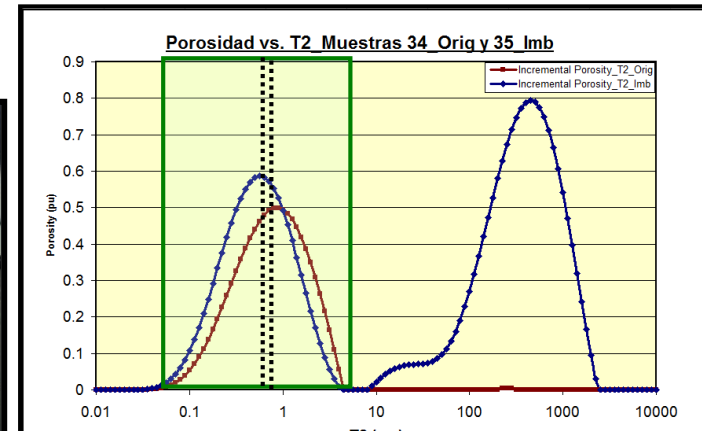
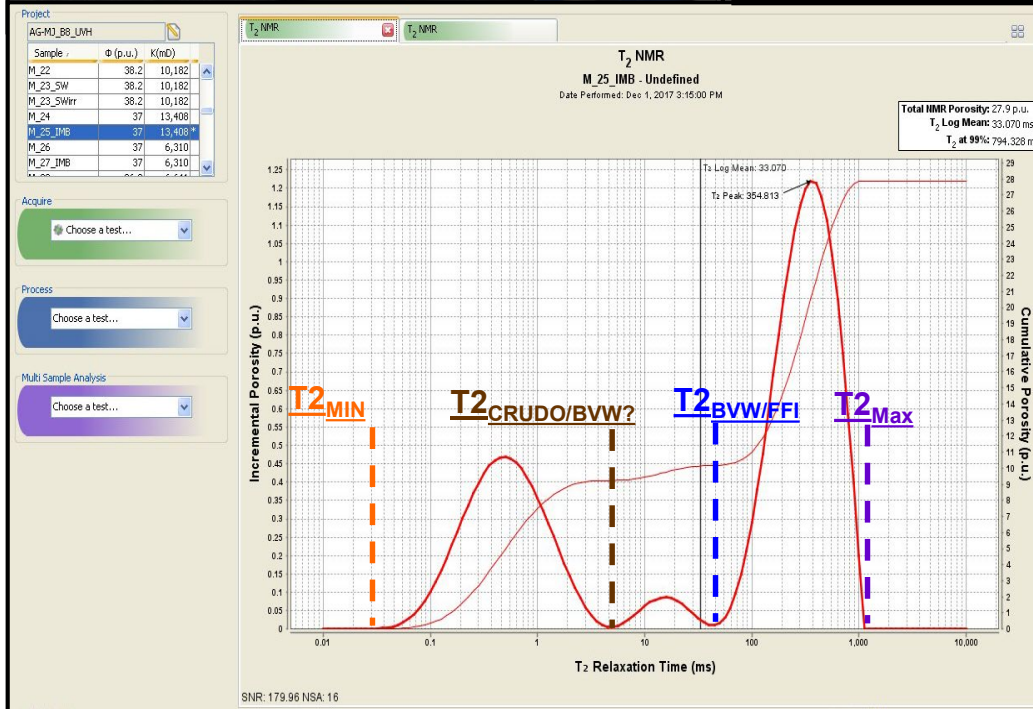
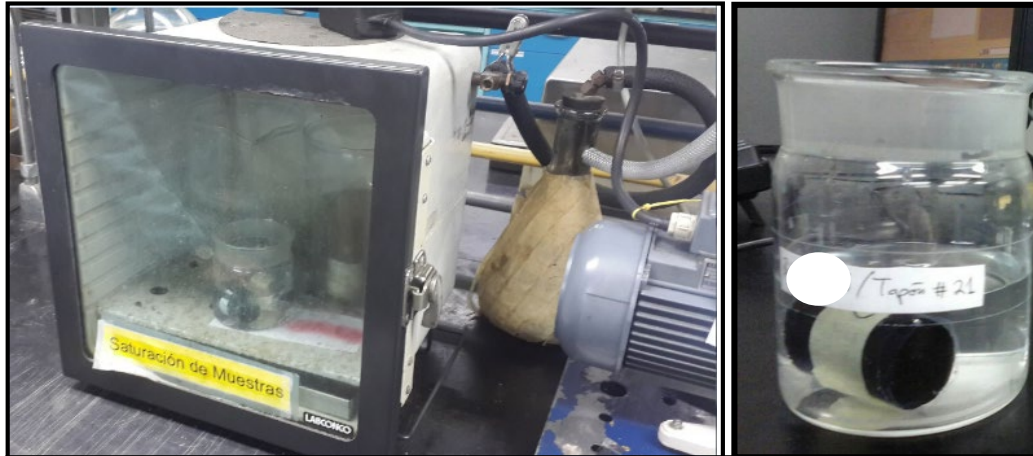
INDICE_H

0,32332



II.b) Estudio de Análisis Especiales de RMN (Lab) en Núcleos y Fluidos.

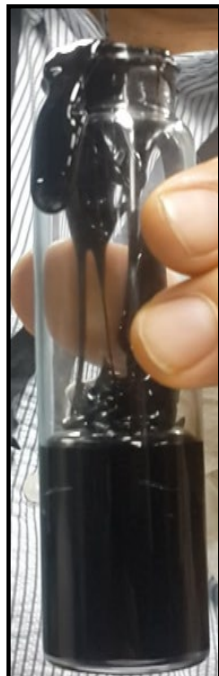
Pruebas de T2 en Tapones Embebidos



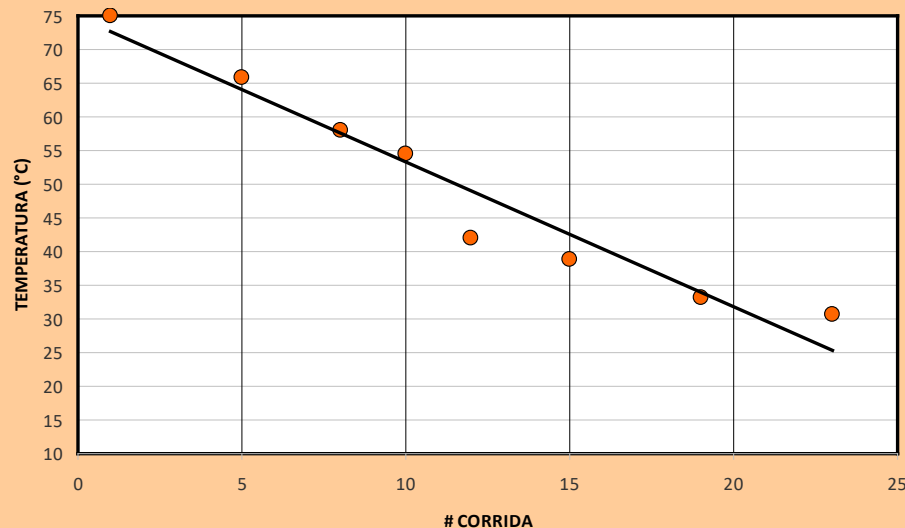


II.b) Estudio de Análisis Especiales de RMN (Lab) en Núcleos y Fluidos.

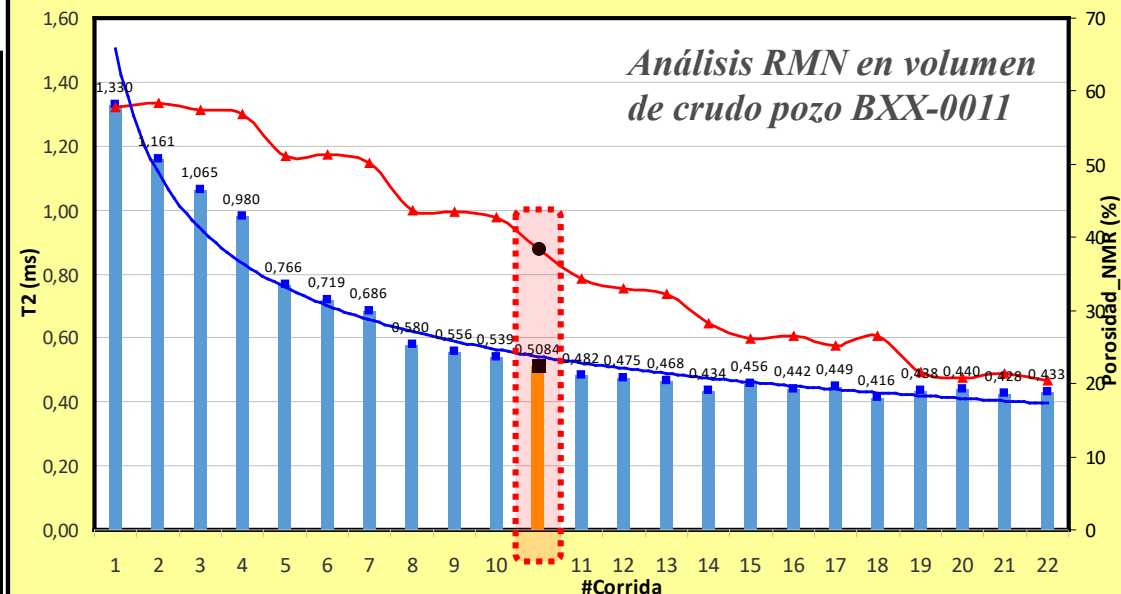
Pruebas RMN en Volumen
de Crudo disponible



TEMPERATURA VS. #CORRIDAS DE T2



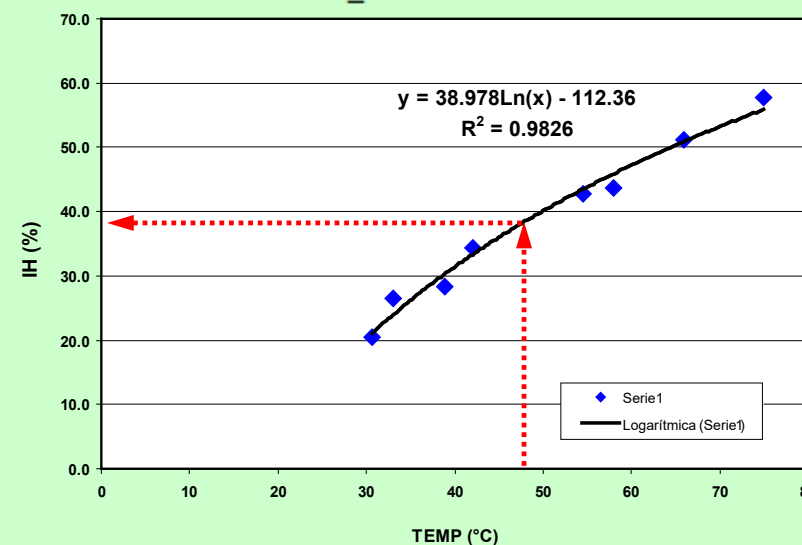
T2 y Porosidad_NMR para cada Corrida



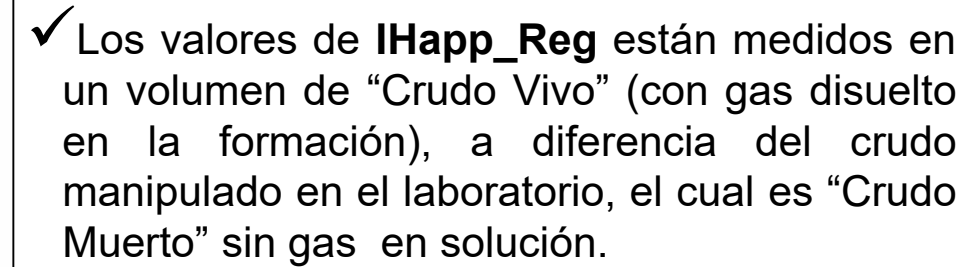
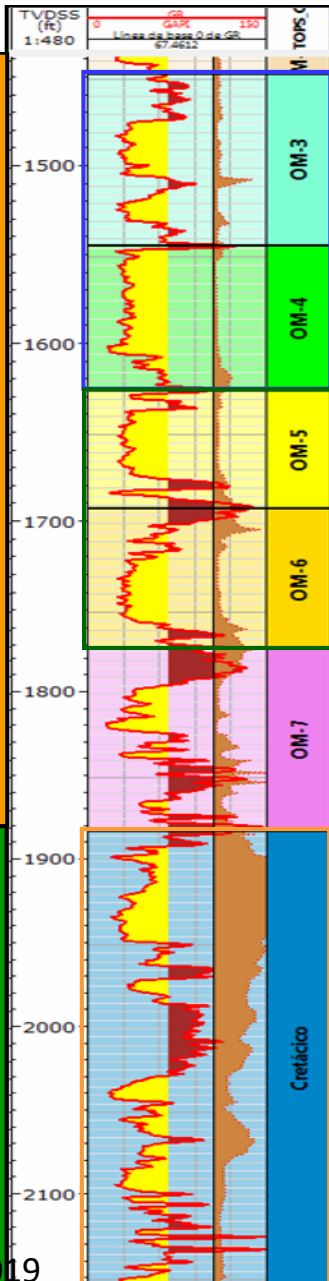
Análisis de T2 a Temperatura de Formación

CORRIDAS	TEMPERATURA (°C)	T2 Log Mean (ms)	T2 Peak (ms)	T2 @99% (ms)	PhiT_NMR (%)
Tyac Interpolada	47.8	0.5084	0.5940	1.9950	38.4

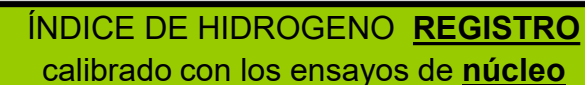
IH_T2 VS. TEMP



FM. TIGCAN



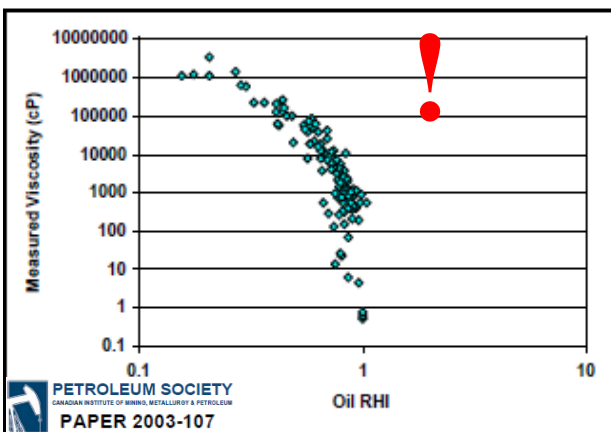
POZO
BXX-0011



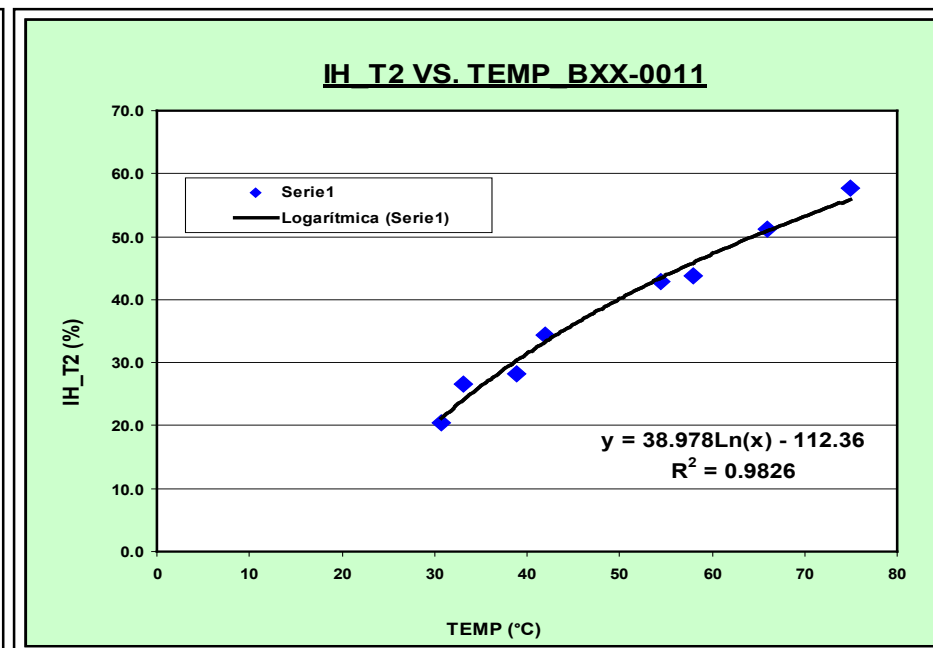
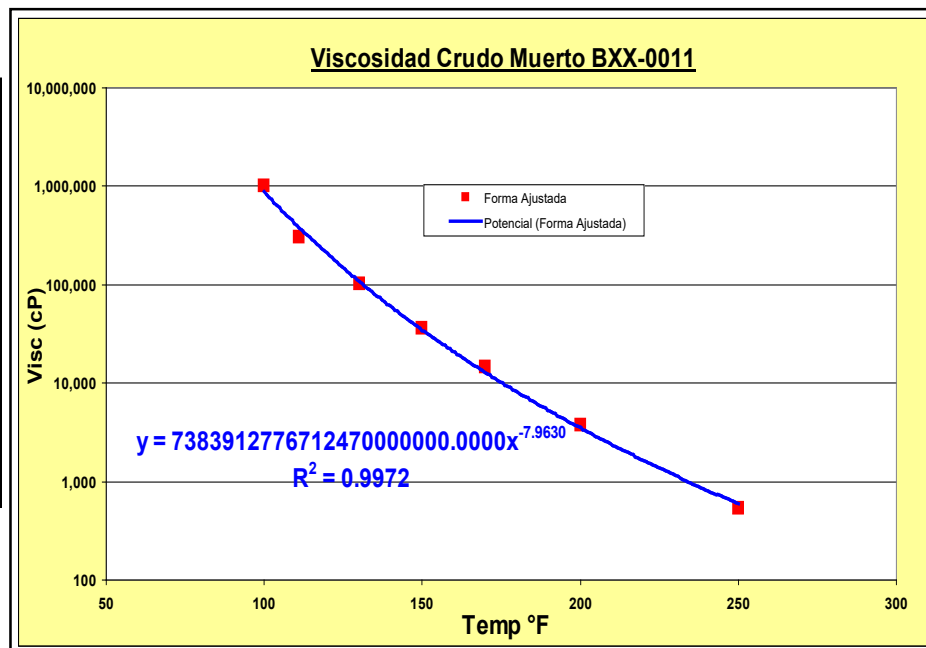


III.a) Correlación de Viscosidad en base a los datos validados.

El pozo BXX-0011 cuenta con ensayos en muestras de crudo a nivel del Cretácico de:
Viscosidad medida a varias temperaturas ; *Índice de Hidrógeno medido a varias temperaturas.*

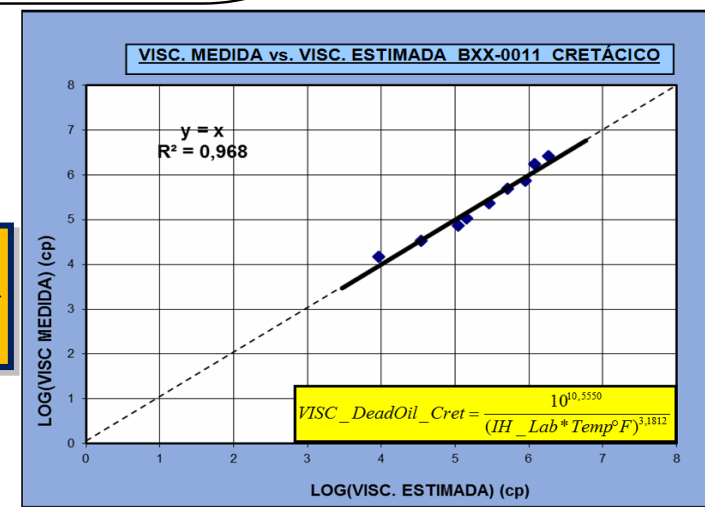


En la literatura se recomienda realizar correlaciones matemáticas basadas en las mediciones en un gran número de muestras de varios pozos, a una misma temperatura de la formación (Bryan&Katz, JCPT-2008).



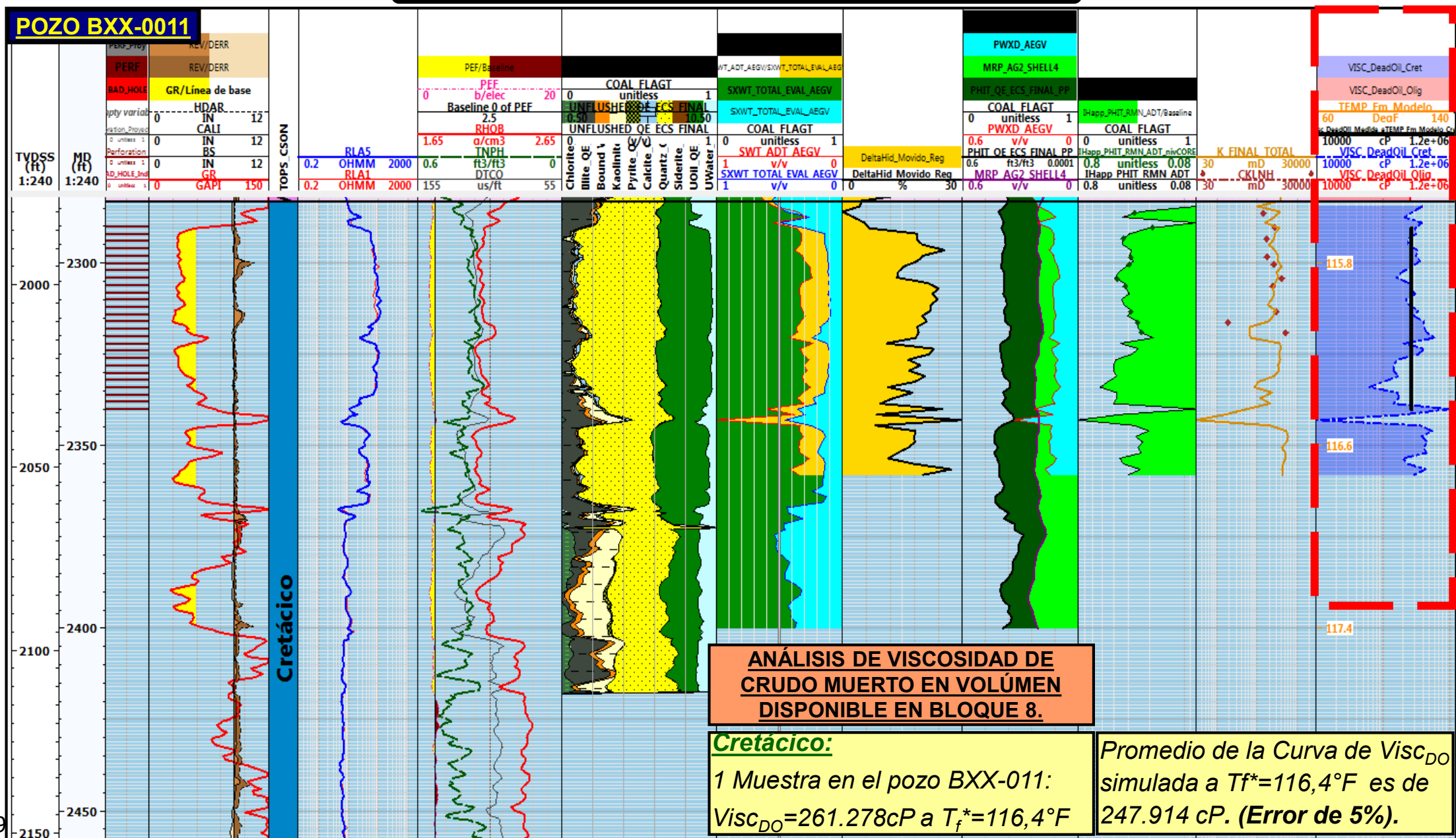
Medidas en Crudo del pozo BXX-0011 (Cretácico)		
Temperatura °C	Viscosidad (cP) Medida	IH
75,0	14750	0,577
65,9	33559	0,511
58,0	73920	0,437
54,5	107720	0,428
47,8	234363,6	0,384
42,0	488613	0,344
38,9	746664	0,283
33,1	1763876	0,265
30,7	2591642	0,205

$$VISC_{DO} = \frac{10^{10.5550}}{(IH_{Lab} * Temp^{\circ}C)^{3.1812}}$$





III.a) Correlación de Viscosidad en base a los datos validados.

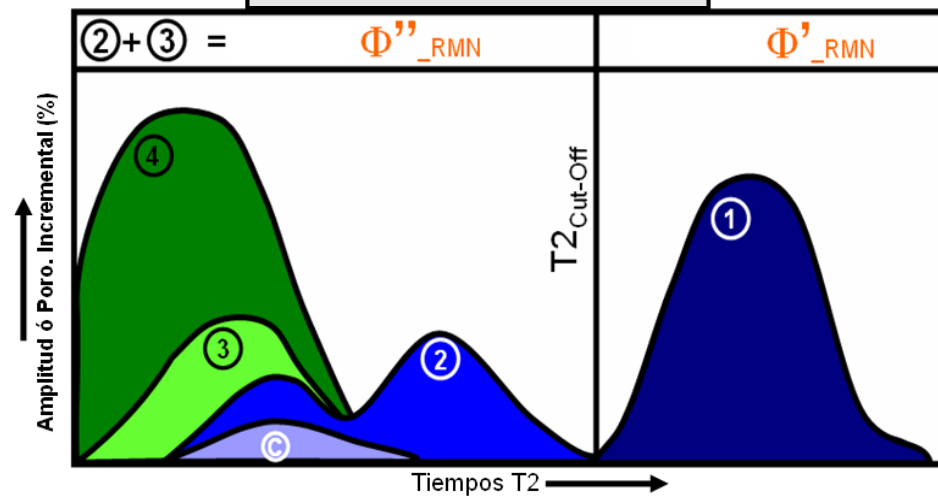


III.c) Determinación de Ecuaciones de Permeabilidad_RMN ajustadas al Campo.

Ecuación de Permeabilidad de Coates usando RMN

Requiere como datos de entrada la Porosidad Total y un factor especial que relaciona los poros más grandes de la roca entre los poros más pequeños (FFI/BVW):

$$k = C * \phi_{NMR}^4 * (\phi_{FFI} / \phi_{BVW})^2$$



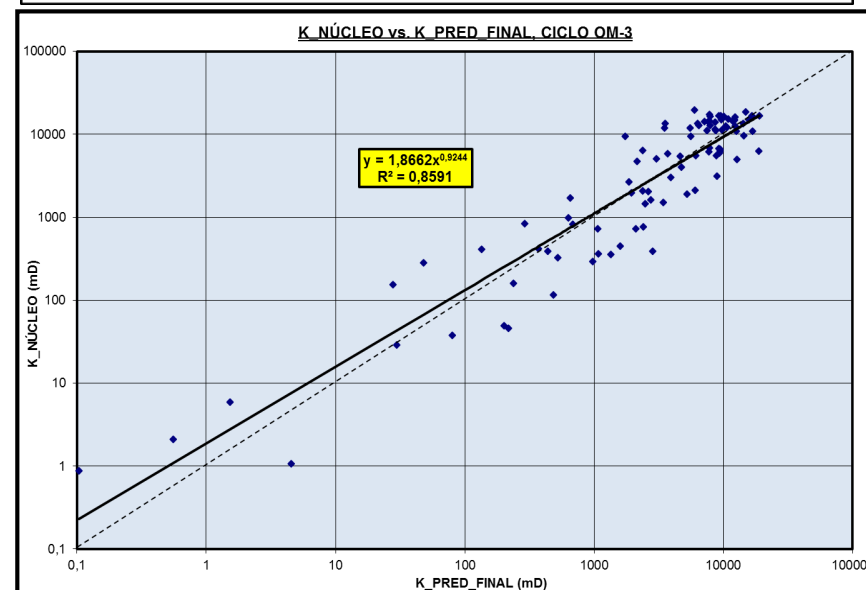
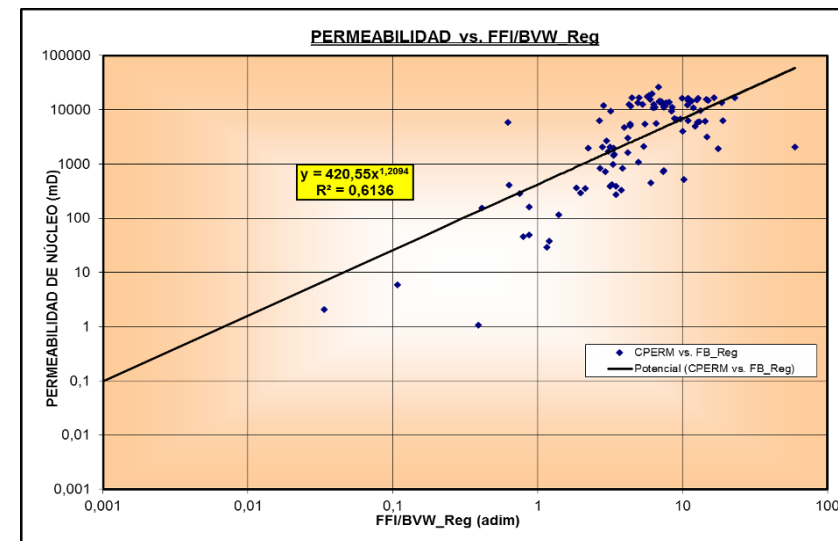
- ① = Vol. Agua Libre en la Formación
- ② = Vol. Agua Irreducible en la Formación (CBW+BVW)
- Ⓒ = Vol. Agua en Arcillas ó CBW (forma parte de [2])
- ③ = Vol. Crudo Visible por Reg. RMN
- ④ = Vol. Crudo InVisible por Reg. RMN

$$FFI_{Modificado_AGMJ} = (v1) + (v3) + (v4)$$

$$BVW_{Modificado_AGMJ} = (v2)$$

$$FFI_M = \phi'_{RMN} + \phi_{Crudo_Visible_porRMN} + \phi_{Crudo_InVisible_porRMN}$$

$$BVW_M = \phi_{Reg.Dieléctrico} - \phi'_{RMN}$$

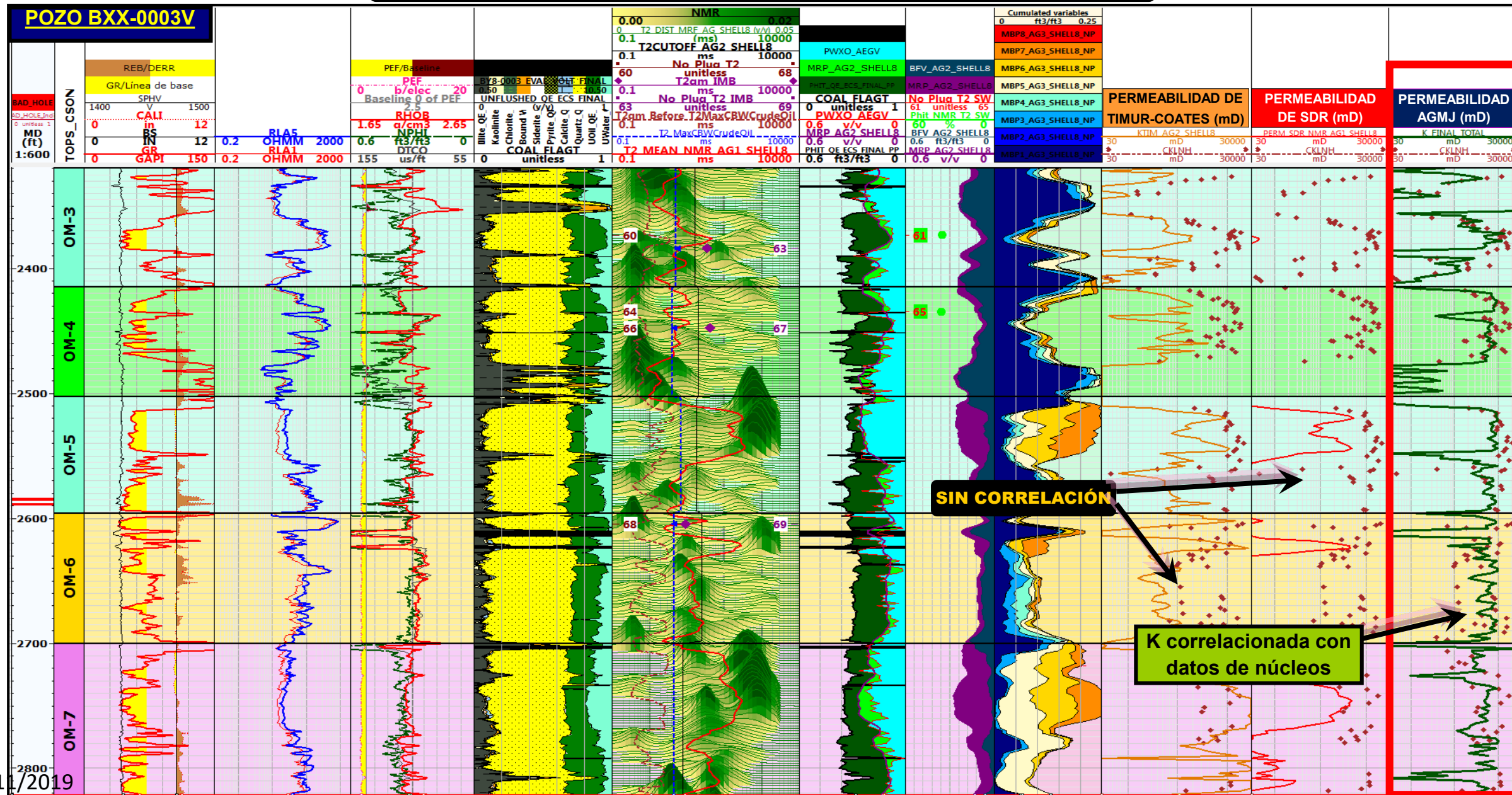


$$\text{Log}(K_{inicial}) = 2.05308 + 4.2552 * \text{Log}(\Phi_{efec}) - 1.1599 * \text{Log}(WCLA) + 0.1618 * \text{Log}(FFI_M) - 1.8218 * \text{Log}(BVW_M)$$

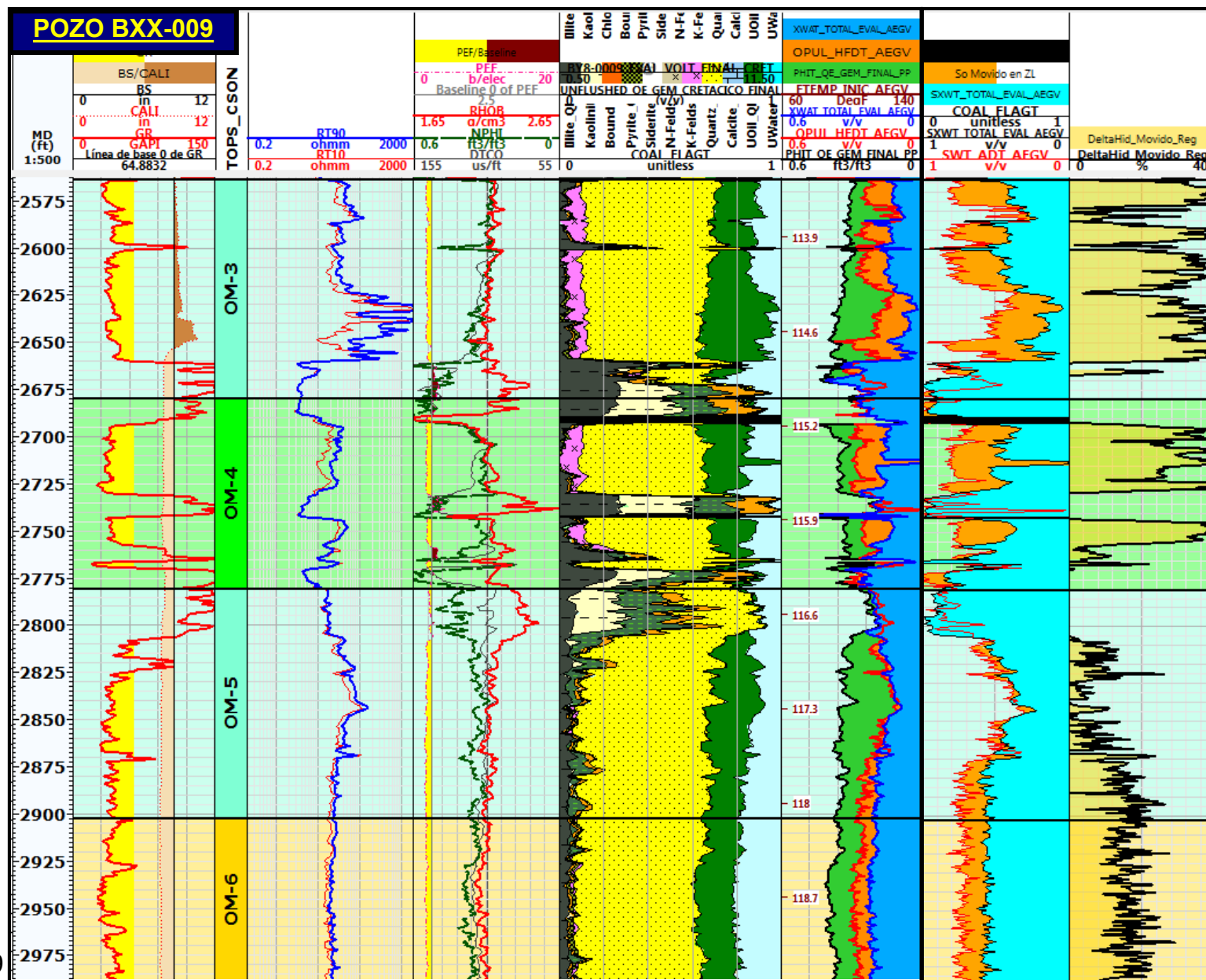
$$K_{OM-3} = 10^{[-0.0387 * \text{Log}^3(K_{inicial}) + 0.1594 * \text{Log}^2(K_{inicial}) + 1.1949 * \text{Log}(K_{inicial}) + 0.85]}$$



III.c) Determinación de Ecuaciones de Permeabilidad_RMN ajustadas al Campo.



III.d) Definición de Movilidades de Crudo a lo largo del pozo, en toda el área



$$En\ Z.V. = SO_{Inicial} = 1 - SW_{Inicial}$$

$$En\ Z.L. = SO_{Final} = 1 - SW_{Final}$$

$$En\ Z.V. = SO_{Inicial} = \cancel{1} - SW_{Eval.Petrof.}$$

$$En\ Z.L. = SO_{Final} = \cancel{1} - Sxo_{RDIEL}$$

$$\Delta SO = Hid.Movido = SO_{Inicial} - SO_{Final}$$

$$\Delta SO = Sxo_{RDIEL} - SW_{Eval.Petrof.}$$

$$\Delta SO = (Sxo_{RDIEL} - SW_{Eval.Petrof.}) * 100$$



IV.a) Variación de la viscosidad entre Fm. Oligoceno y Cretácico

ANÁLISIS DE VISCOSIDAD EN VOLÚMENES DE CRUDO DISPONIBLES EN BLOQUE 8.

Oligoceno:

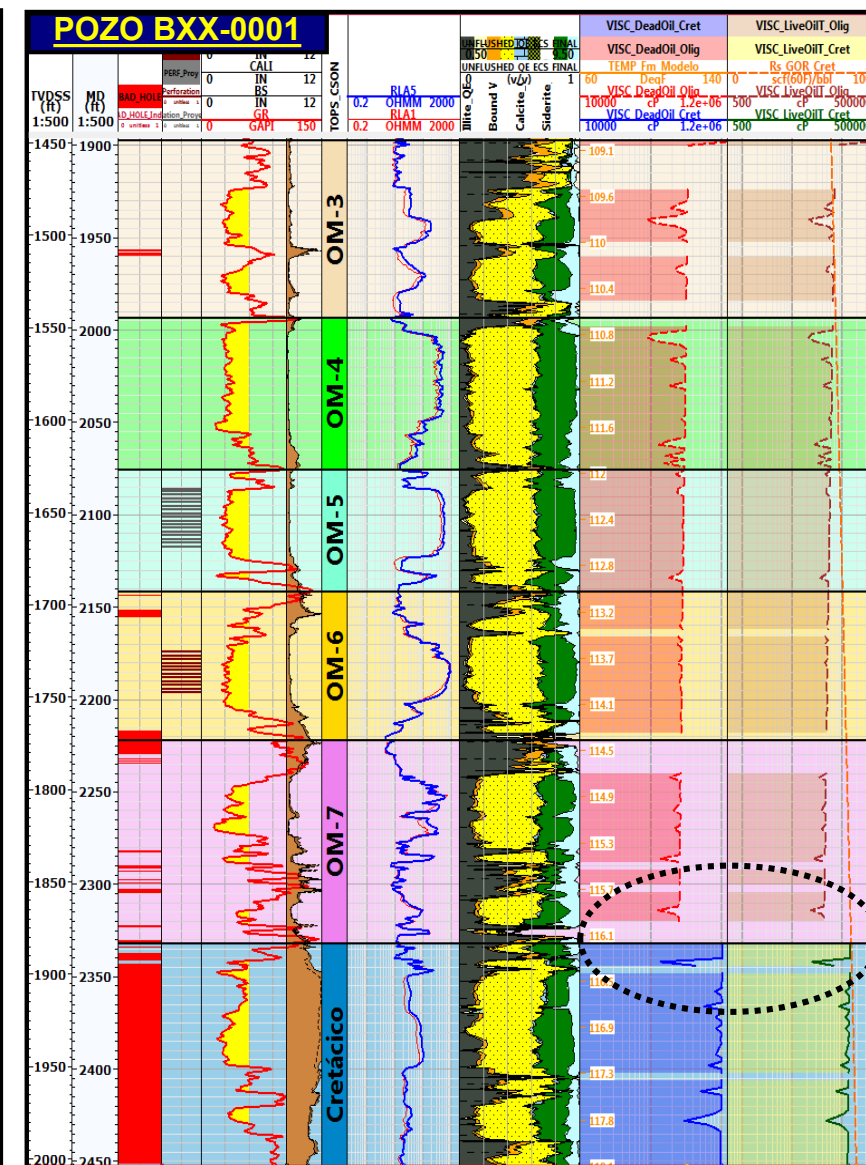
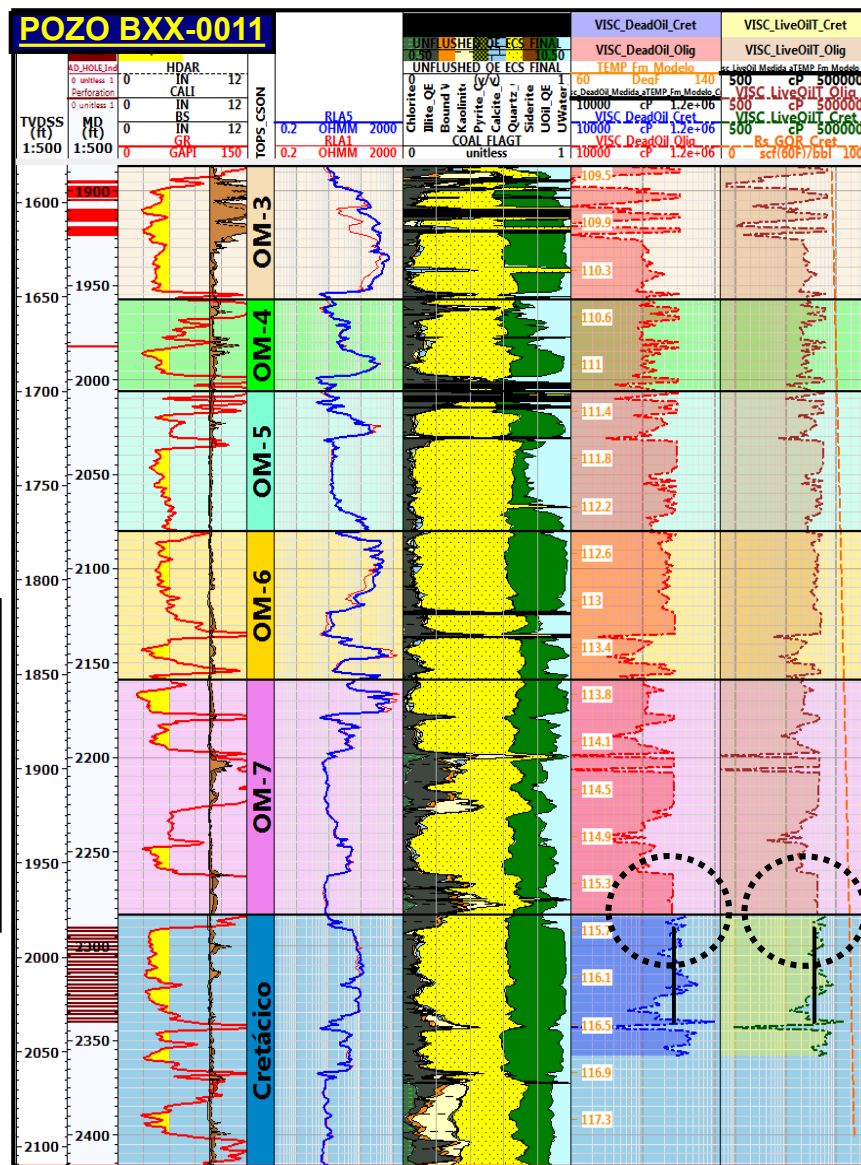
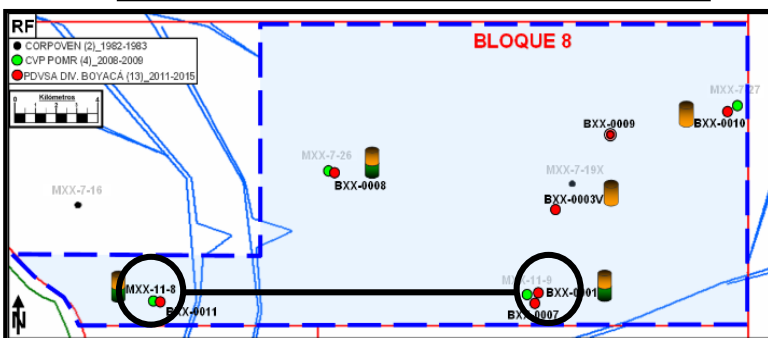
1 Muestra en el pozo MXX-7-26 a
nivel de OM-4 y OM-5.

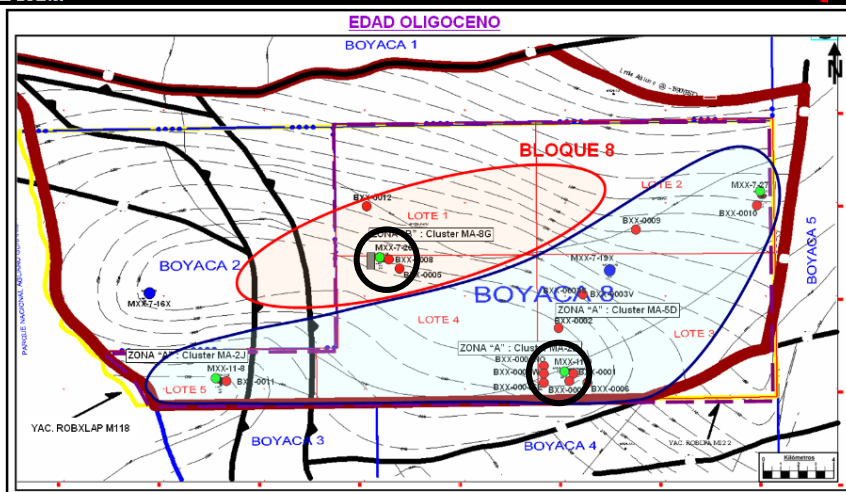
$$\text{Visc}_{DO} = 83.286 \text{ cP a } T_f = 114^\circ \text{F}$$

Cretácico:

1 Muestra en el pozo BXX-011:

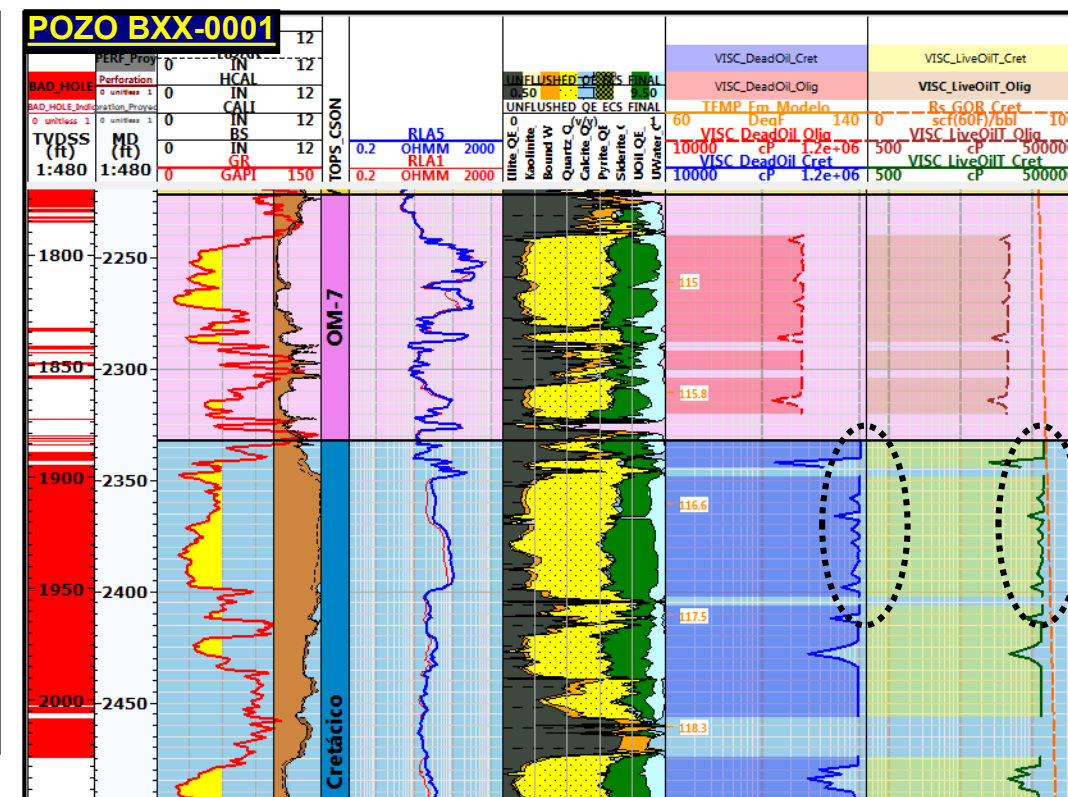
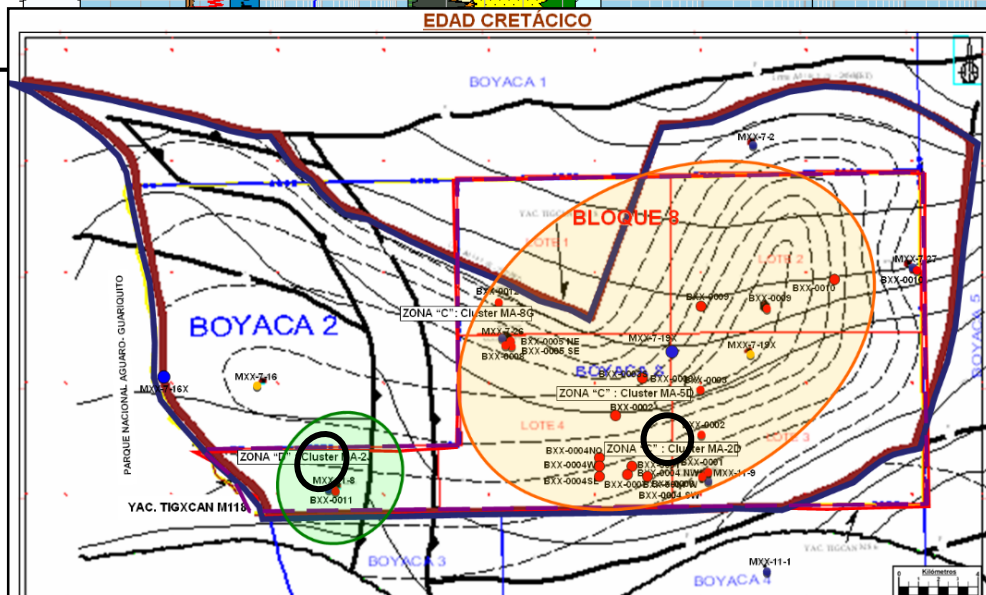
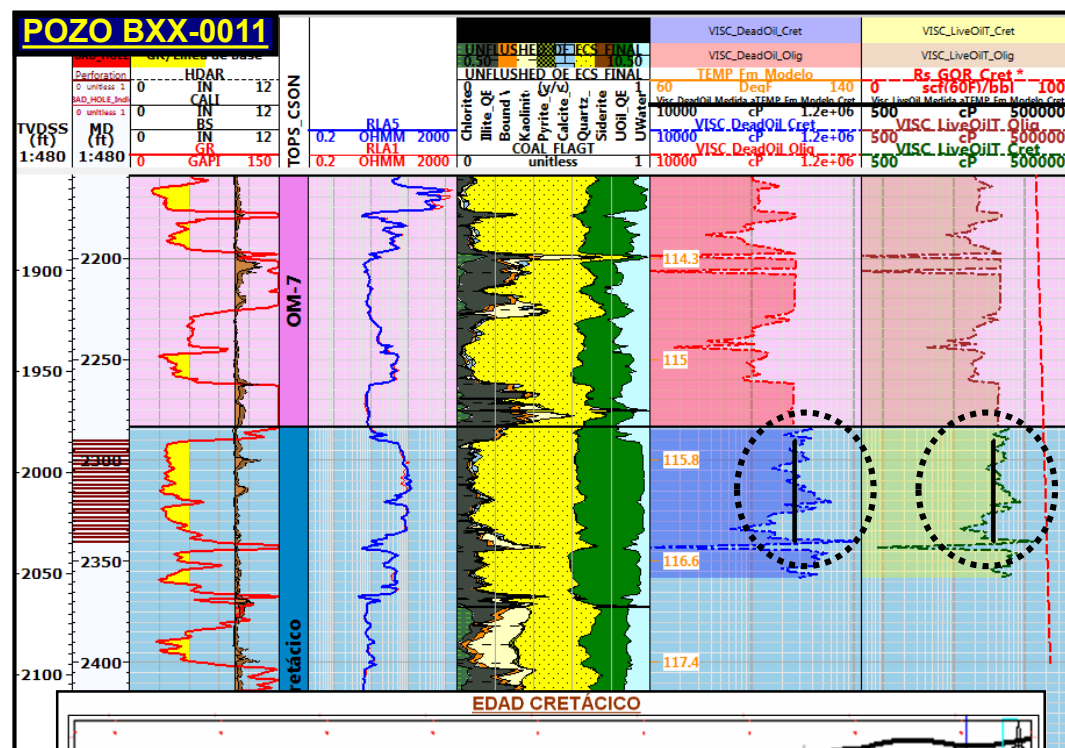
$$\text{Visc}_{DO} = 234.364 \text{ cP a } T_f = 118^\circ \text{F}$$



[illegible]

 ZONA "A" : Cluster MA-2D, Cluster MA-5D y Cluster MA-2J
 ZONA "B" : Cluster MA-8G

IV.a) Nivel de Variabilidad vertical y areal de viscosidad

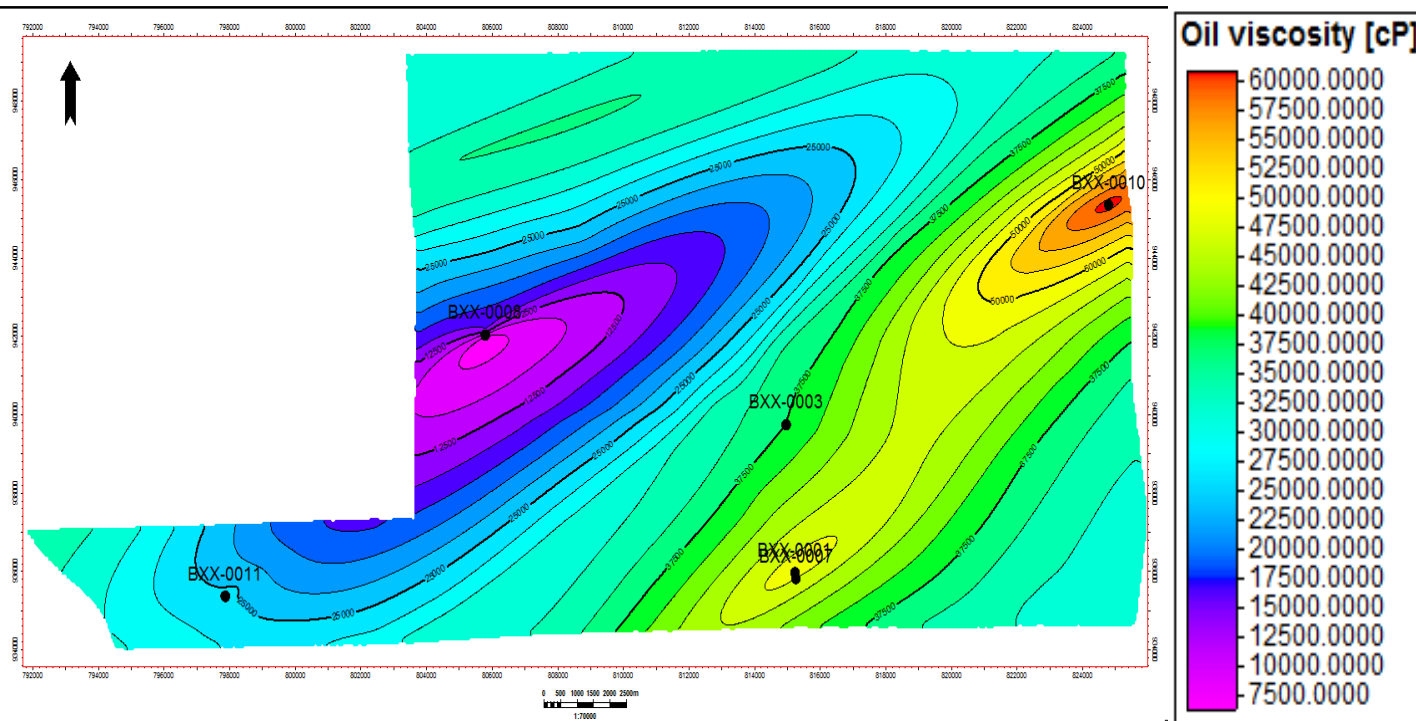


Zonas de nivel de variabilidad areal de la viscosidad **Cretácico**

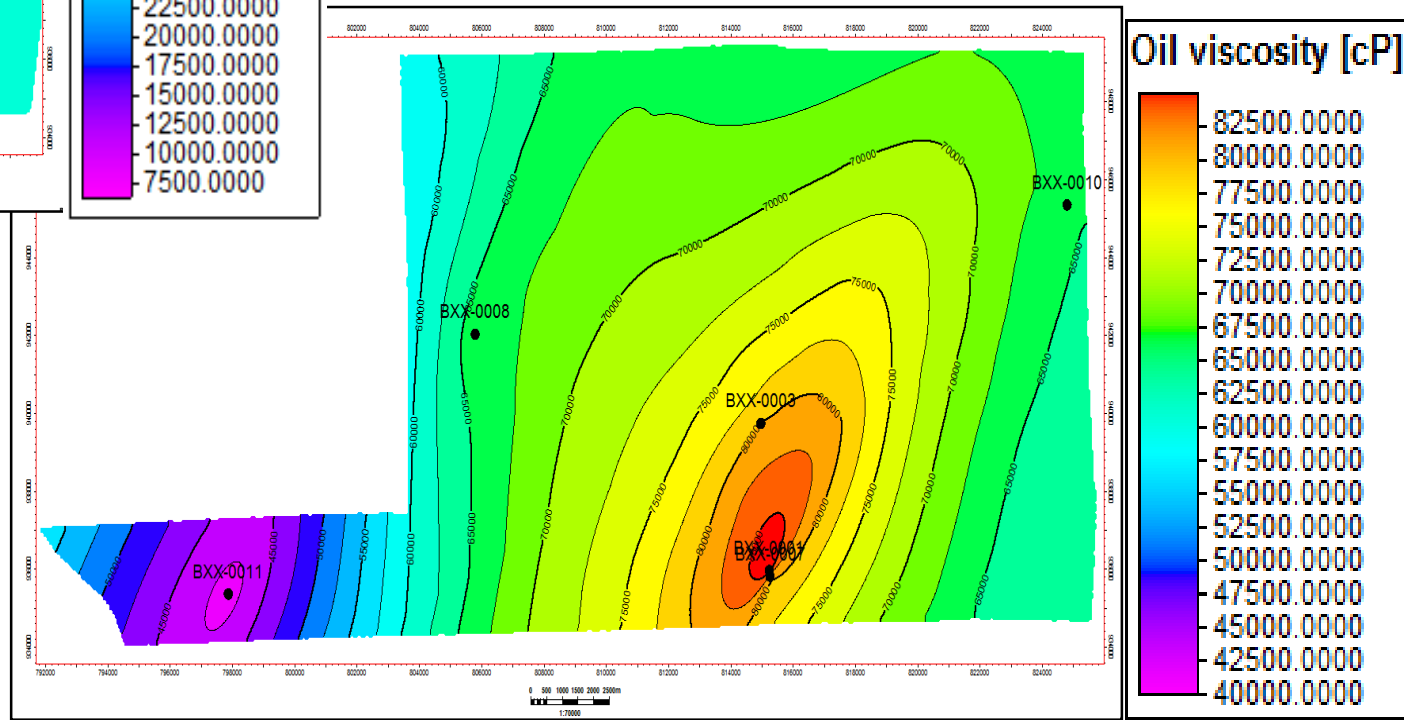
-  ZONA "C" : Clusters MA-2D, MA-5D y MA-8G
 ZONA "D" : Cluster MA-2J

IV.a) Nivel de Variabilidad Areal de viscosidad

MAPA DE INTERPOLACIÓN DE VISCOSIDADES A NIVEL DEL HORIZONTE TERCIARIO



MAPA DE INTERPOLACIÓN DE VISCOSIDADES A NIVEL DEL CRETÁCICO





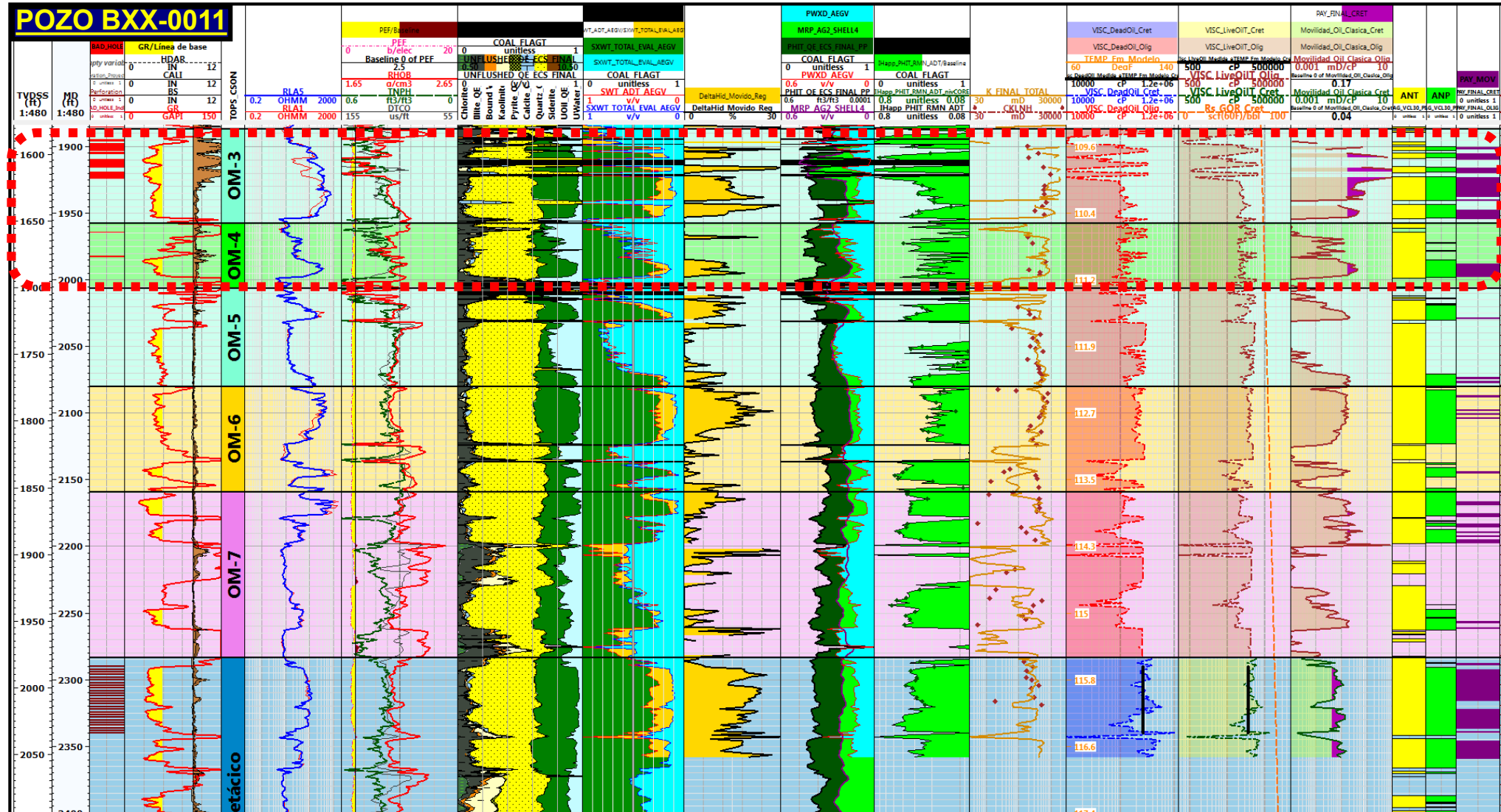
IV.c) Nivel de Variabilidad en Movilidad (por Pozo)

Movilidad del Crudo (Ecuación Clásica)

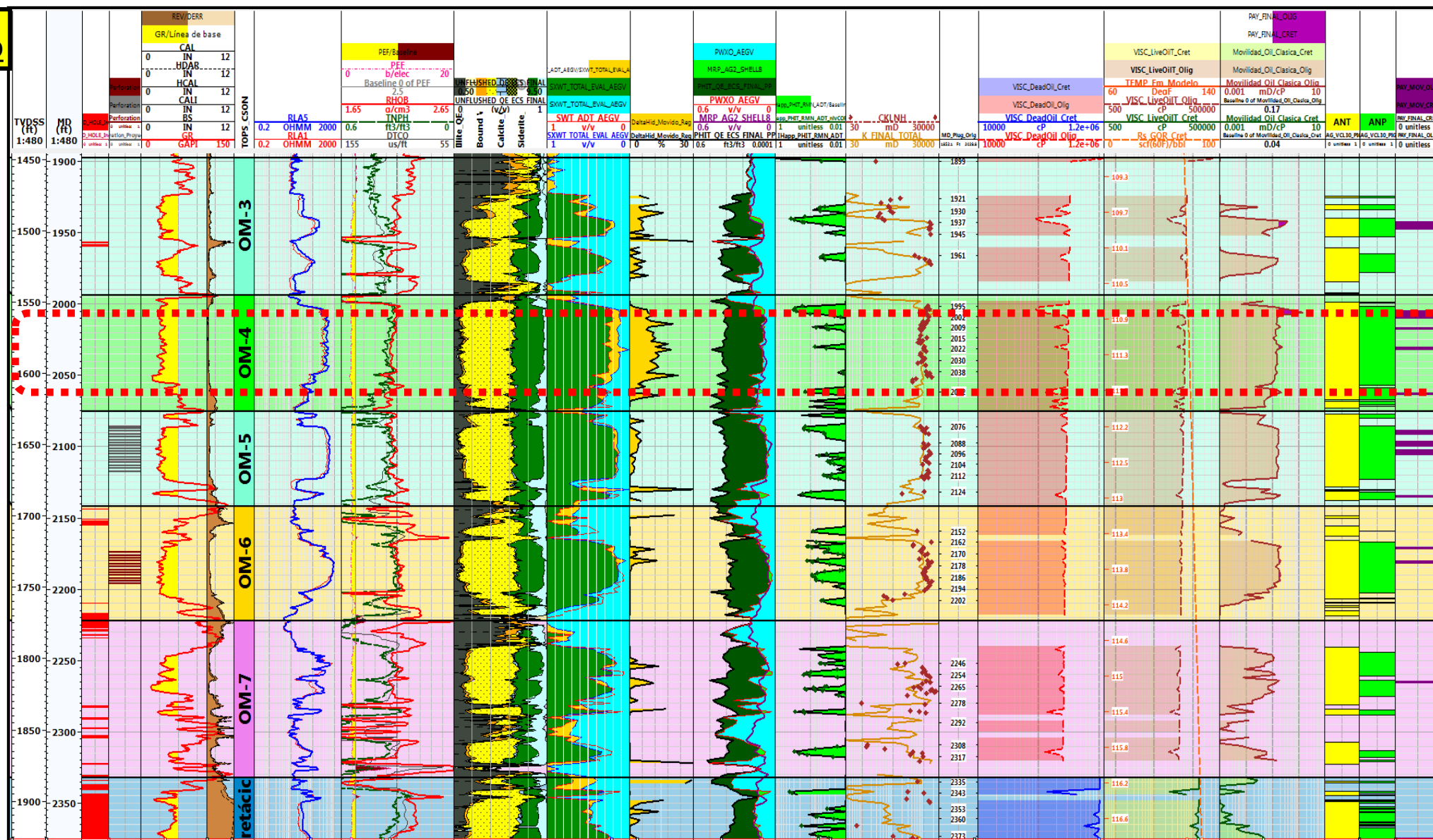
$$Mov.Crudo = \frac{K_{abs} * K_{ro}}{Visc_{LiveOil}} ; \text{Donde, } K_{ro} \text{ es } F(Sw)$$

Valores Cut-Off de Movilidad Clásica Crudo usados:

- Oligoceno= 0.17 mD/cP (pozo referencia BXX-0008/MXX-7-26)
- Cretácico= 0.04 mD/cP (pozo referencia BXX-0011)



POZO BXX-0001
EDAD: OLIGOCENO



INTERVALO PROSPECTIVO PARA SER EVALUADO EN FUTUROS RA/RC

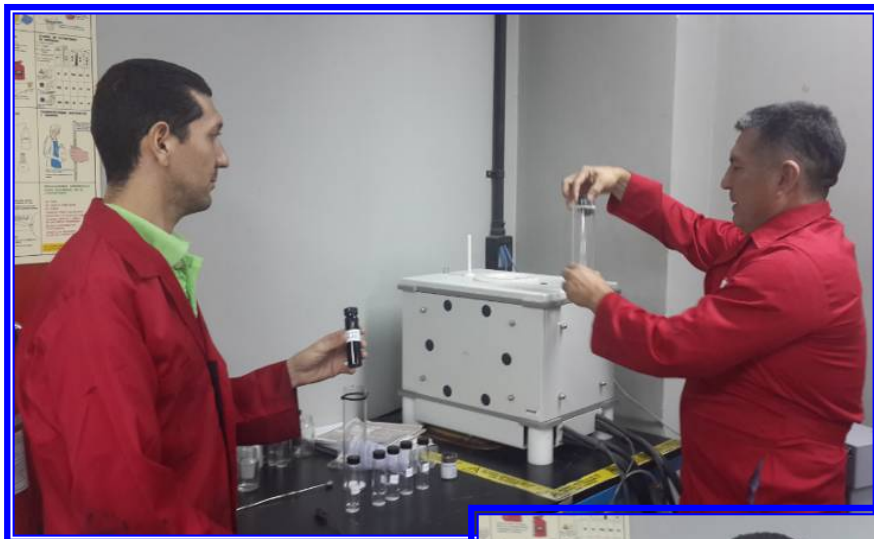


CONCLUSIONES

1. Los resultados RMN en tapones originales y embebidos, indicaron ciertos solapamientos entre las señales de crudo y agua irreducible. Esto corrobora que la técnica de dividir el Dominio T_2 puede presentar errores.
2. La integración de los Registros RMN y Dieléctricos (RMN/RDIEL) permitió calcular un parámetro $IHapp_{Reg}$, el cual fue posible cotejar y validar con los datos de $IHapp_{Lab}$ medidos en núcleos y muestras de crudo.
3. Se logró correlacionar la viscosidad del crudo muerto medida en las muestras recolectadas, con la variable $IHapp_{Lab}$ y con la temperatura.
4. La integración $RMN/RDIEL$ permite calcular óptimamente parámetros importantes como FFI_M y BVW_M , lo cual repercute en datos de entrada de alta calidad para Modelos de Permeabilidad más precisos.
5. El cruce entre la Sw_{RDIEL} y la $Sw_{Total_Eval.Petrof}$ ($DSat.Crudo.Movido$), puede usarse como referente para estimar el desplazamiento del crudo en la zona lavada y como indicativo de su Movilidad en términos comparativos.
6. Se observaron variaciones areales en la viscosidad del crudo en el Bloque 8: A nivel Cretácico, el Bloque se puede dividir en 2 zonas (Este y Oeste); en el Oligoceno se identifican 2 regiones (Norte y Sur).
7. Se constató que en algunos pozos, los ciclos con mejores propiedades dinámicas (viscosidad y movilidad) aún se mantienen sin desarrollar y son oportunidades a recomendar para futuros trabajos de RA/RC ó RMH.
8. La integración RMN/RDIEL contribuye a definir cambios de *Facies*, presencia de CAPI, secciones arcillosas, e intervalos parcialmente saturados (No Acuíferos) que representan posibles prospectos a evaluar a futuro.

RECOMENDACIONES

- Los parámetros de calibración para las herramientas de RMN deben ser lo más cercano posible a $t \approx 0.11$ ms, $TE \approx 0.22$ y $TW > 6sg$, de tal manera que se registre un rango muy bajo de tiempos de distribución T2 para este campo.
- Para aplicar o ajustar esta metodología en otras áreas de la FPO, es indispensable que los datos a integrar sean medidos a un mismo radio de investigación, tal como lo es el caso de los Registros de RMN y Registros Dieléctricos.
- Para la ejecución de análisis de RMN en muestras de núcleos frescas, se sugiere el uso termómetros de fibra óptica en los equipos resonadores, de manera que permitan monitorear la temperatura de las muestras sin extraerlas del equipo entre las corridas.



MUCHÍSIMAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!