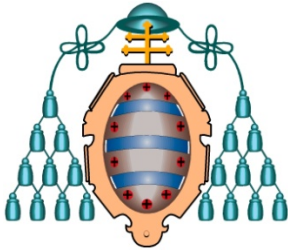


**UNIVERSIDAD DE OVIEDO
FACULTAD DE GEOLOGÍA
MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA
GEOLÓGICA**



PROYECTO FIN DE MASTER

“Interpretación y Correlación de Registros Geofísicos en Sondeos de Captación de Aguas Subterráneas para la Determinación de los Parámetros Hidrogeológicos de los Acuíferos Cretácicos de la Zona Central de Asturias”

**Autora: Dorliana de la Aurora López Ortíz
Directora: Beatriz González Fernández**

Oviedo, Julio 2013

D^a. Beatriz González Fernández, Profesora del Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo,

CERTIFICA:

Que ha revisado la memoria del trabajo de fin de máster “Interpretación y Correlación de Registros Geofísicos en Sondeos de Captación de Aguas Subterráneas para la Determinación de los Parámetros Hidrogeológicos de los Acuíferos Cretácicos de la Zona Central de Asturias” realizado por Dña. Dorliana López Ortiz bajo su dirección y autoriza su presentación para los efectos oportunos.

Oviedo, julio de 2013

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios todopoderoso por haberme dado la oportunidad de cruzar fronteras, experimentar otras culturas, por permitirme cumplir el día de hoy con una meta más de mi vida. Gracias padre celestial por acompañarme en todo momento. Contigo todo lo puedo.

A la UNIVERSIDAD DE OVIEDO, por acogerme en sus aulas y permitirme compartir con todos los profesores que contribuyeron a enriquecer mi formación profesional. Es un privilegio haber formado parte del estudiantado de esta alma máter y de llevar siempre conmigo parte del conocimiento de tan prestigiosos profesores de la Facultad de Geología.

A mis padres por apoyarme y confiar en mí, éste es un nuevo logro que también se los debo a ustedes.

A mis compañeros de Máster, me permitieron integrarme rápidamente al núcleo de estudios. Gracias por la alegría, confianza y el cariño que me brindaron.

A José Manuel por su apoyo incondicional, por motivarme cada día a desarrollarme y potenciar mi formación. Que Dios nos acompañe en esta nueva etapa de vida.

A mi asesora Beatriz González por su valiosa colaboración y participación en este proyecto. Gracias por orientarme y ayudarme a mejorar.

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. Introducción y Objetivos.....	3
2. Localización geográfica del área en estudio	6
3. Antecedentes.....	9
4. Contexto geológico e Hidrogeología	11
4.1 Geología	12
4.2 Hidrogeología.....	14
4.2.1 Descripción de niveles hidrogeológicos.....	14
4.2.1 Funcionamiento hidrogeológico	17
5. Metodología	18
5.1 Fundamentos de las diagráfias.	19
5.2 Sondeos	27
5.3 Software de simulación Geotechnical Solutions (GS).....	27
6 Interpretación de Registros.....	36
6.1 Interpretación cualitativa.....	37
6.2 Interpretación cuantitativa.....	56
7. Correlación de pozos.....	67
8. Conclusiones	71
9. Referencias Bibliográficas.....	73
10. Anexos	75
ANEXO I. Ecuaciones del software.....	76
ANEXO II. Diagráfias	80
ANEXO V. Fotos ejecución de sondeos	82

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster consiste en la interpretación de los registros geofísicos Gamma Natural, Potencial Espontáneo, Resistividad, Sónico, Neutrón, Densidad, y Caliper, realizados en sondeos perforados en el Cretácico de la Zona Central de Asturias (área de Pola de Siero).

Mediante el software GS (Geotechnical Solutions) se llevará a cabo una interpretación cualitativa (comportamiento de las curvas) y cuantitativa (contenido en arcillas, resistividad del agua de formación, porosidad y permeabilidad) con el objetivo de identificar los acuíferos atravesados y, dentro de éstos, los niveles de mayor permeabilidad.

Posteriormente se realizará una correlación de los tramos definidos en los distintos sondeos.

Con los resultados obtenidos se podrán definir los niveles más óptimos para un mejor y más sostenible aprovechamiento de estos acuíferos.

ABSTRACT

This Master's Thesis research relates to the interpretation of Gamma Natural, Spontaneous Potential, Resistivity, Sonic, Neutron, Density and Caliper geophysical logs, taken in wells drilled in the Central Asturias Cretaceous Zone (Pola de Siero area).

Using the software GS (Geotechnical Solutions), it will perform a qualitative (logs behavior) and quantitative interpretation (shale content, formation water resistivity, porosity and permeability) in order to identify crossed aquifers and, within these, the higher permeability levels.

Subsequently, there will be a correlation of the sections defined in the different wells.

With the results, we can define the optimal levels for a better and more sustainable use of these aquifers.

1. Introducción y objetivos

Los datos existentes sobre los usos de las aguas subterráneas en España indican que existe una utilización muy baja en comparación con la mayoría de los países europeos y de modo más significativo en el caso de los abastecimientos urbanos (Llamas et al., 2001). Mientras que en países de características similares a España los porcentajes de utilización para este uso oscilan entre el 50 y el 80%, en España apenas sobrepasan el 20%. En lo que respecta al regadío, de los 3.4 millones de hectáreas regadas, en aproximadamente un millón se utilizan las aguas subterráneas como recurso principal, y en zonas como Baleares, Canarias, Castilla – La Mancha, Murcia y Comunidad Valenciana predomina su uso por encima del de las aguas superficiales. El aspecto más relevante de la utilización de los acuíferos para regadío es su mayor eficiencia con respecto a las aguas superficiales.

La infrautilización de las aguas subterráneas en España, especialmente en los abastecimientos urbanos, contrasta con la construcción de grandes presas ya que España ocupa el primer lugar de la Unión Europea y casi en el mundo, en número de embalses por habitante.

Pero además España es un país con un elevado potencial hidrogeológico y aunque el volumen de agua subterránea almacenada en los acuíferos es difícil de estimar con precisión, es muy superior (unas 10 a 100 veces) a la recarga anual que reciben. Una muestra de esta capacidad de almacenamiento es el acuífero terciario detrítico de Madrid que con una extensión de unos 6000 km² se estima que en sus 300 m superiores almacena unos 90000 hm³ de agua dulce. Si se compara esta cifra con los 55000 hm³ que pueden almacenar todos los embalses de España (Llamas et al., 2001) se puede deducir la importancia que deberían tener las aguas subterráneas en el abastecimiento.

Sin embargo y a pesar de la baja utilización de los acuíferos en nuestro país, cuando ésta se llevó a cabo, en muchos casos se hizo de un modo totalmente incontrolado, sin planificación y sin criterio hidrogeológico, provocando la sobreexplotación (muy frecuente en el Mediterráneo) y la contaminación de acuíferos.

En este sentido, la investigación hidrogeológica y el desarrollo de técnicas que faciliten dicha investigación representan un elemento esencial de cara a la planificación y gestión del abastecimiento de agua. Dentro de las técnicas de investigación hidrogeológica, la prospección geofísica es una de las que presentan mayor interés por la gran información que aporta sobre las características del subsuelo que alberga a las

aguas subterráneas. En general se trata de métodos indirectos que, mediante la medida de una serie de parámetros, permiten determinar qué zonas del subsuelo son más favorables para el almacenamiento de agua.

La geofísica puede aplicarse desde superficie o en pozos; en el primer caso, de los diferentes métodos que existen (gravimétrico, magnético, sísmicos, eléctricos), los sísmicos y eléctricos (incluyendo los electromagnéticos), especialmente estos últimos, son los más utilizados en hidrogeología. En el segundo caso la técnica utilizada se denomina Testificación Geofísica de Sondeos que consiste en caracterizar los materiales perforados en un sondeo, y/o el fluido presente. Esta caracterización se basa en diferentes parámetros físicos medidos como son la resistividad eléctrica del material, su radiactividad natural, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, la temperatura y conductividad del fluido presente en el sondeo y/o la formación acuífera, etc. La Testificación Geofísica de Sondeos se puede considerar, hoy, una herramienta indispensable en la investigación hidrogeológica por las ventajas que posee, tanto desde el punto de vista de los datos que permite obtener como por la buena relación coste/beneficio ya que, en general, representan un coste adicional muy bajo en el monto total que supone la perforación de uno o varios sondeos.

El objetivo fundamental de este trabajo es confirmar la presencia de dos acuíferos en el Cretácico de la Zona Central de Asturias y estimar sus parámetros hidrogeológicos a partir de la interpretación y el análisis de los diferentes registros geofísicos testificados en varios sondeos de las localidades de Arguelles y Granda. Se pretende, también, establecer una correlación estratigráfica.

2. Localización geográfica del área de estudio

La zona objeto de estudio se sitúa en el área central de Asturias, en las localidades de Argüelles y Granda, pertenecientes al concejo de Siero (Fig. 1). La parcela en la que se han perforado cuatro de los sondeos es la parcela rural nº 226 del Polígono 83 (Fig. 2A), y se caracteriza por pertenecer a una zona de relieves suaves atravesada por el río Noreña. Está delimitada en tres de sus lados por otras parcelas y en su cuarto lado, por el cauce del río Nora. En esta parcela se han realizado un total de cuatro sondeos de investigación: dos sondeos o pozos de bombeo profundos (PB-1 y PB-2) y un pozo de observación o piezómetro (PZ-1 y PZ-2) por cada uno de los pozos de bombeo. La distribución en la parcela es bastante regular de manera que los sondeos constituyen una cuadrícula en la que la distancia entre ellos varía entre 27 y 61 m (Fig. 2B). Un quinto sondeo, el AC-530, está situado en el polígono industrial de Granda (Fig. 2C).

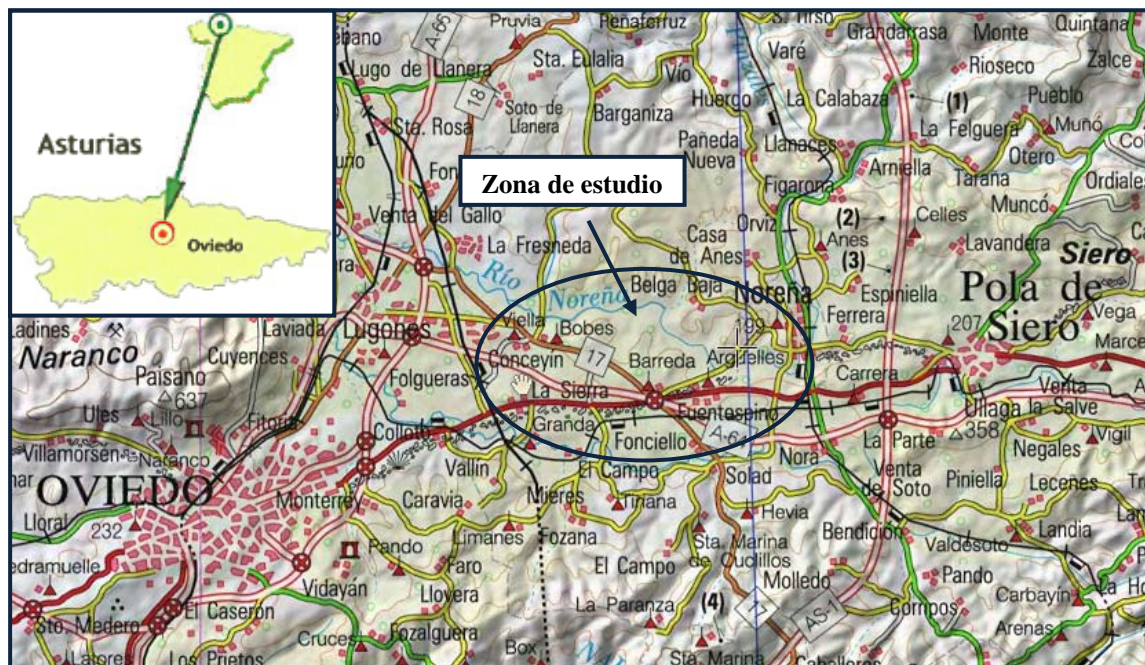


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

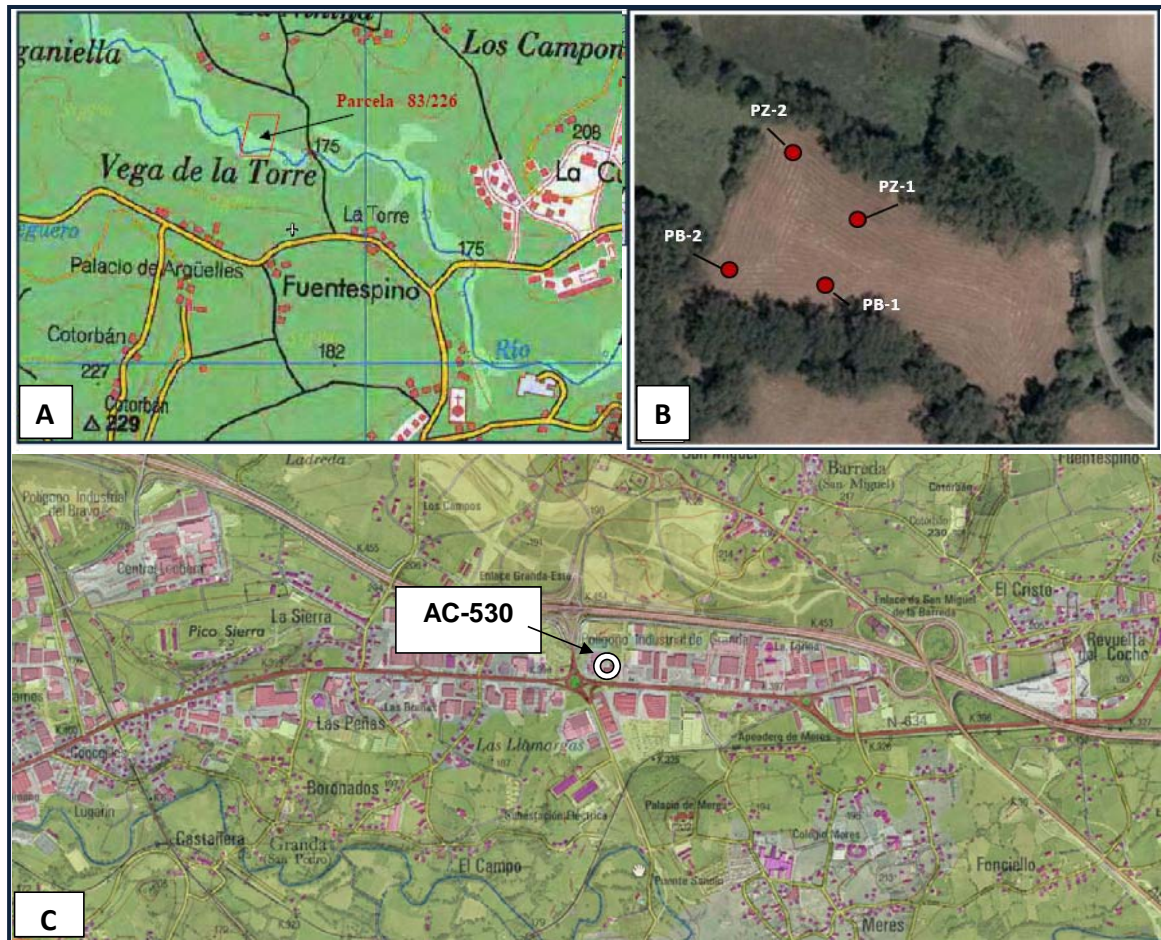


Figura 2. Ubicación de los sondeos estudiados. A: localización de la parcela de Argüelles, B: distribución de los sondeos PB y PZ dentro de la parcela, C: situación del sondeo AC-530.

3. Antecedentes

Con el fin de mejorar el abastecimiento de agua en la zona central de Asturias según el Convenio de Gestión Directa realizado por el Ministerio de Medio Ambiente el 23 de noviembre del 200, la Universidad de Oviedo en conjunto con la sociedad estatal Aguas de la Cuenca del Norte, S.A. (**acuaNorte**) suscribió un acuerdo de prestación de asistencia científica que tuvo como resultado la elaboración de un “Estudio geológico e hidrogeológico de la cuenca mesoterciaria de Oviedo-Llanera-Siero”. Las primeras conclusiones obtenidas con dicho estudio indican la existencia de dos acuíferos de tipo multicapa independizados hidráulicamente por un conjunto muy continuo de materiales impermeables y confinados por una cobertera de materiales terciarios de baja permeabilidad.

En ese marco, Aguas de la Cuenca del Norte, S.A. elaboró la prestación del servicio de “Ejecución de sondeos de investigación de aguas subterráneas en los acuíferos de la cuenca Oviedo-Llanera-Siero” en la que se proyectó llevar a cabo la ejecución de dos sondeos profundos para la explotación (pozos de bombeo) junto con un pozo de observación por cada uno de los sondeos. Mediante estos trabajos se pretendía evaluar los caudales, hacer una estimación de los parámetros hidráulicos y conocer mejor el funcionamiento hidrogeológico de los principales acuíferos captados en los materiales cretácicos de la cuenca Oviedo-Siero.

Se ejecutaron diferentes tipos de registros geofísicos en los sondeos perforados y una vez concluidos los sondeos, como parte de la labor de investigación y del proceso de optimización del funcionamiento de cada pozo, se realizaron ensayos de bombeo en cada uno de ellos por separado, obteniéndose los parámetros hidráulicos de los acuíferos.

El informe elaborado por la Universidad de Oviedo recoge la descripción de todos los trabajos realizados, los datos obtenidos, análisis e interpretación, que dieron como resultado diversas conclusiones y recomendaciones que deben tomarse en consideración para la caracterización y explotación de estos acuíferos.

4. Contexto geológico e hidrogeológico.

4.1. Geología

Desde el punto de vista geológico, esta zona pertenece a la denominada Cuenca de Oviedo – Llanera – Siero, situada dentro de la Depresión Mesoterciaria Central de Asturias (Fig. 3A). A su vez forma parte de la Cordillera Cantábrica, que es una cadena originada durante la orogénesis alpina. En este sector central, la cordillera está constituida por un bloque de basamento varisco, perteneciente a la Zona Cantábrica, la más externa del Macizo Varisco Ibérico, levantado por un gran cabalgamiento de basamento (Alonso et al., 1996; Pulgar et al., 1999) (Fig. 3B).

La Cuenca de Oviedo forma la parte más occidental de un afloramiento de materiales mesozoicos y terciarios preservados de la erosión por la actuación de varias fallas de origen alpino y originadas por el rejuego alpino de antiguos cabalgamientos variscos, que se extiende entre Oviedo y Cangas de Onís. En el sector estudiado, la estructura alpina más importante en la zona es la Falla de Llanera, que limita la cuenca por el N y configura su geometría actual (ver figura 3B). Este cabalgamiento representa una antigua falla directa relacionada con los procesos extensionales mesozoicos, como queda atestiguado por la conservación de la sucesión permo-jurásica en su bloque norte, mientras que al sur de la falla -cuenca de Oviedo- los materiales cretácicos se apoyan directamente sobre el basamento paleozoico (Alonso et al., 1996; Pulgar et al. 1999).

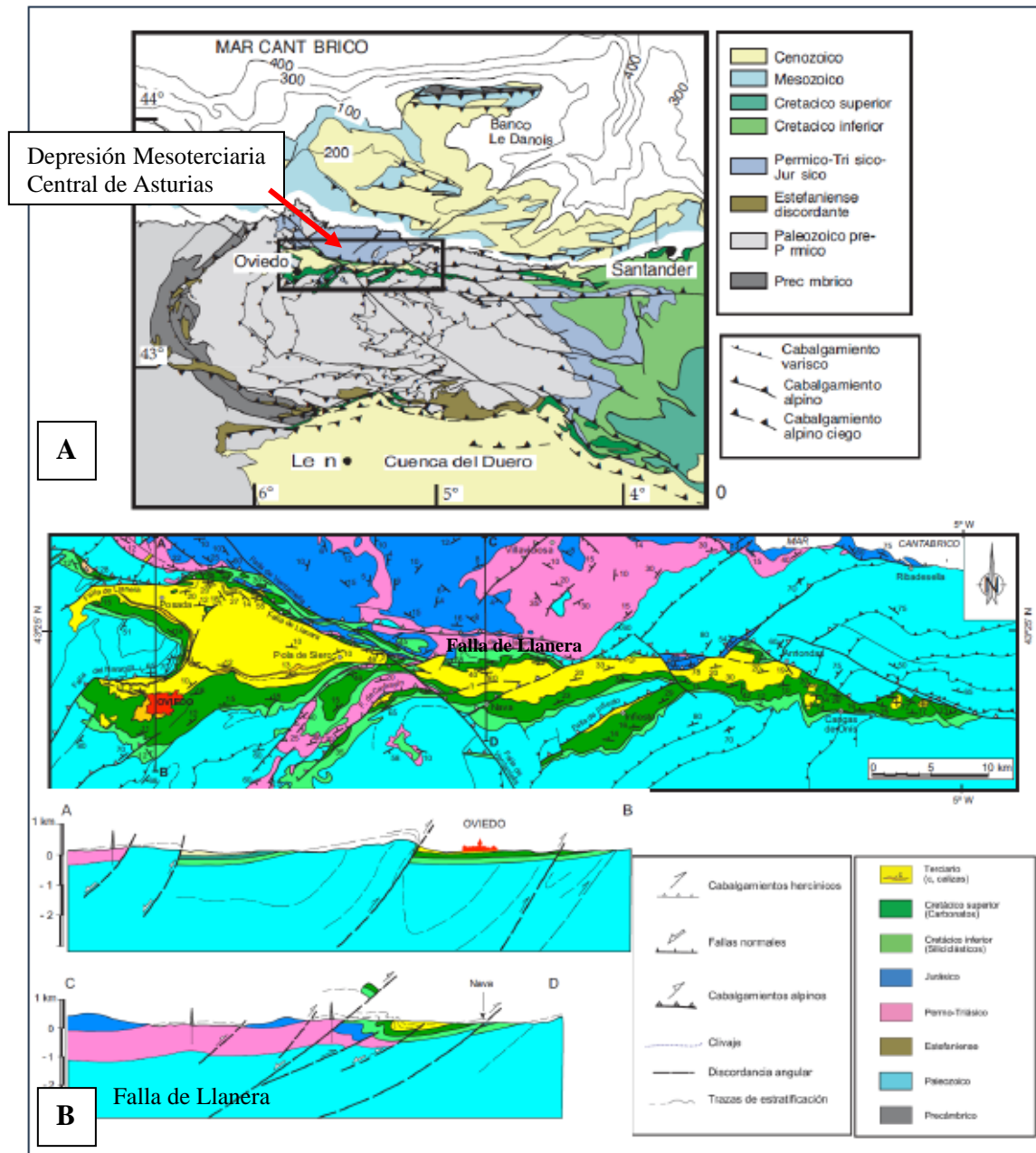


Figura 3. Mapa de situación geológica de la zona estudiada y corte geológico general de la Cordillera Cantábrica (Alonso et al., 1996; Pulgar et al., 1999)

Los materiales más antiguos que forman el sustrato o basamento de la cuenca de Oviedo pertenecen al Silúrico, Devónico y Carbonífero (Beroiz et al., 1973; Gutiérrez Claverol, 1995). Presentan importantes variaciones de facies y de espesor, y están representados por una alternancia de sucesiones siliciclásticas (Areniscas de Furada, Areniscas del Naranco y carbonatadas (Grupo de Rañeces, Caliza de Moniello y Caliza de Montaña).

Por encima del Paleozoico se dispone discordantemente, el Mesozoico, constituido, por una sucesión de materiales cretácicos agrupados en ocho unidades litoestratigráficas, (González et al., 2004), denominadas, de muro a techo: Pola de Siero, Ullaga, El Caleyu, La Manjoya, Latores, San Lázaro, La Argañosa y Oviedo. En la parcela en la que se han realizado los sondeos de investigación hidrogeológica, la Formación Oviedo está totalmente erosionada.

Finalmente sobre el Cretácico se dispone el Paleógeno que está formado por sedimentos continentales (fluvio-lacustres), dispuestos discordantemente sobre un paleorrelieve karstificado.

4.2 Hidrogeología

La zona de estudio pertenece a la Unidad Hidrogeológica UHG 01.22 de Oviedo-Cangas de Onís. Según la caracterización establecida en aplicación de la Directiva Marco del Agua, esta cuenca pertenece a la masa de agua 012.006, denominada Oviedo-Cangas de Onís. Sobre los acuíferos de esta unidad se dispone la cobertera paleógena compuesta fundamentalmente por materiales de baja permeabilidad con la excepción de algunos niveles que pueden constituir acuíferos para aprovechamiento local.

4.2.1. Descripción de los niveles hidrogeológicos.

Uno de los sondeos perforados en la parcela de Argüelles, el PZ-2 cuya profundidad alcanzó los 729,75 m, se realizó con extracción de testigo continuo lo cual permitió describir de modo muy preciso la litología y espesor de los acuíferos atravesados. En la Figura 4 se muestra la columna hidroestratigráfica de este sondeo que se puede considerar representativa de la zona estudiada.

- **Acuífero Inferior.**

Está formado por los materiales permeables de las formaciones Pola de Siero, Ullaga, El Caleyú, La Manjosa y Latores. Consiste, por lo tanto, en una sucesión de calizas bioclásticas, que en algunos tramos presentan karstificación, con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, incluidas dentro de las formaciones Ullaga y La Manjosa y los tres conjuntos terrígenos de areniscas pertenecientes a las formaciones Pola de Siero, El Caleyú y Latores. La formación Pola de Siero presenta en otras zonas de la cuenca un tramo inferior de conglomerados silíceos que en estos sondeos no se han cortado. Esta formación desaparece hacia el oeste y las formaciones El Caleyú y Latores pasan a calizas arenosas hacia el norte y este de la cuenca. La potencia total de este acuífero en los sondeos estudiados es de 170 m.

- **Acuífero Superior.**

Está constituido por las calizas bioclásticas y karstificadas del miembro superior de la Fm. San Lázaro, las areniscas y los microconglomerados silíceos de la Fm. La Argañosa, las calizas karstificadas de la Fm. Oviedo y los conglomerados calcáreos del tramo basal del Paleógeno. Sin embargo en los cuatro sondeos de la parcela de Argüelles la Fm. Oviedo está totalmente erosionada y la Fm. La Argañosa lo está parcialmente.

- **Tramo Impermeable (Acuicludo)**

Está constituido por los miembros inferior y medio de la Fm. San Lázaro. En los sondeos estudiados el miembro inferior está formado por 37 m de margas y lutitas de color gris oscuro con lentejones de carbonatos. Por encima, se dispone el miembro medio constituido por 30 m de calizas margosas, de aspecto noduloso, grises y algo glauconíticas, con intercalaciones de lutitas.

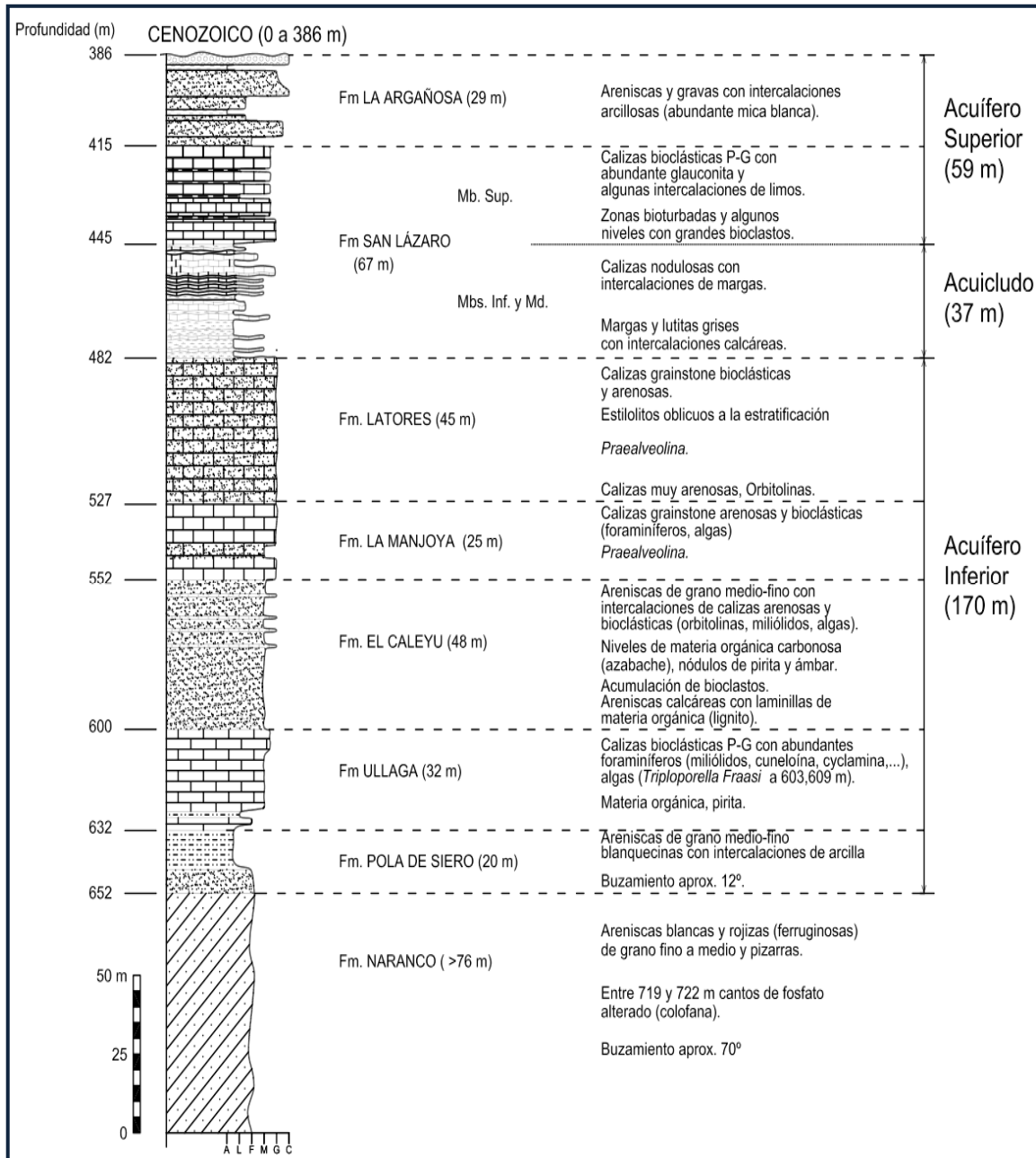


Figura 4. Columna hidroestratigráfica del sondeo PZ-2.

4.2.2. Funcionamiento Hidrogeológico.

Acuífero inferior

Hidrodinámicamente presenta un comportamiento de tipo multicapas. La recarga del acuífero procede mayoritariamente de la lluvia y también puede ser alimentado por los acuíferos paleozoicos sobre los que se dispone. La descarga natural se realiza a través de manantiales y directamente a los ríos.

Acuífero superior

También funciona como acuífero multicapas. Se recarga fundamentalmente mediante las precipitaciones caídas sobre la superficie aflorante. La descarga natural tiene lugar a través de manantiales, zonas de drenaje difuso o directamente a los ríos.

Ambos acuíferos, en la zona de estudio funcionan como confinados. El nivel piezométrico del acuífero inferior se encuentra por encima de la superficie topográfica.

5. Metodología

La metodología empleada en este trabajo consistió en primer lugar en realizar la revisión de todo el material referente al tema en estudio, tales como textos, proyectos referentes a la interpretación de diagrfias, trabajos publicados, páginas web entre otros.

Posteriormente, a toda la información digital de las diagrfias se le asignó el formato requerido en el software GS para poder cargarlas en el mismo y visualizar las curvas correctamente y sin ninguna alteración.

Se llevó a cabo una serie de pasos con la herramienta GS que se detallarán más adelante, con el fin de poder identificar los acuíferos y la respuesta de los diferentes registros ante estas zonas, para realizar la correlación de pozos y análisis cuantitativo de los parámetros hidrogeológicos, volumen de arcilla, resistividad del agua y en general datos confiables para facilitar una adecuada interpretación de las zonas de interés.

A continuación se indicarán los fundamentos básicos de las diagrfias y la importancia que tienen para determinar las propiedades de la roca e identificar el tipo de litología de la zonas registradas, también se explican las características de los sondeos en los que se hicieron los registros y los fundamentos del software.

5.1. Fundamentos de las Diagrfias (Schlumberger, 1975)

Las diagrfias consisten en una serie mediciones o registros geofísicos, obtenidos por una sonda con varios sensores o antenas transmisoras y receptoras que se introduce en una perforación para determinar las curvas de cada parámetro que se desea conocer. Con esta técnica medimos un número de parámetros físicos relacionados con las propiedades geológicas y petrofísicas de los estratos atravesados. Además, los registros nos dan información acerca de los fluidos presentes en los poros de las rocas.

En el pasado, con anterioridad a la invención de los registros geofísicos de pozos, prácticamente la única manera de las propiedades fundamentales de las rocas, era mediante la inspección y análisis directo de las rocas cortadas por las barrenas y pruebas de formación; hoy en día muchas de estas pruebas mecánicas, que llevan tal objetivo, han sido suprimidas obteniéndose la información indirectamente a través de la interpretación de los registros de pozos (Cruz, 1997).

Las diagrañas pueden agruparse en diferentes tipos:

- Eléctricas que miden el potencial espontáneo, la resistividad de la formación, la resistividad del fluido de perforación y la temperatura.
- Radiactivas que miden los de rayos gamma, de neutrones y de densidad.
- Acústicas o sónicas
- Mecánicas que miden las tasas de flujo y diámetro del sondeo.

✓ **Potencial espontáneo (SP).**

Es un registro que mide los potenciales eléctricos, debidos a causas naturales, de los materiales atravesados. Se basa en la diferencia de potencial existente entre un electrodo móvil que se va desplazando por el interior del pozo o sondeo y un electrodo fijo que permanece en la superficie (electrodo de tierra).

El SP es función de las actividades químicas de los fluidos presentes en el sondeo y en las formaciones adyacentes, de la temperatura y del tipo de arcillas existentes. Desde un punto de vista cualitativo la curva del SP tiene gran importancia ya que sus deflexiones nos indican de manera preliminar que existe una circulación interna producida por el movimiento del agua de las formaciones permeables y del sondeo. El SP es muy sensible a diferentes circunstancias naturales y artificiales que pueden falsear los resultados. Un incremento del diámetro del sondeo o de la profundidad de invasión decrece la magnitud de la lectura del potencial espontáneo.

El SP puede utilizarse para:

- detectar capas permeables (solo una indicación cualitativa).
- determinar R_w , resistividad del agua de formación,
- obtener una indicación de volumen de arcilla en una zona.
- indicar el ambiente de depositación.

✓ Resistividad de la formación.

La resistividad de una formación m , es la resistencia en ohmios de un cubo de un metro de lado cuando la corriente fluye entre caras opuestas del mismo. Es una propiedad intrínseca de la materia que depende del tipo de matriz, de la porosidad y de la naturaleza y resistividad del fluido que rellena los poros. Es una propiedad anisótropa debido a que las rocas presentan planos de estratificación y otras discontinuidades que crean direcciones preferenciales en la circulación de los fluidos y en el paso de la corriente y, por tanto, la resistividad no es la misma en todas las direcciones. Generalmente se hacen las mediciones con los siguientes dispositivos:

- Un dispositivo de 64" para medir la resistividad de la formación que no ha sido invadida por el lodo.
- Un dispositivo de 16" para medir la resistividad de la formación que ha sido invadida por el lodo.

Los factores que determinan la resistividad eléctrica de una roca son los siguientes:

- Porosidad
- Composición química del agua que llena los espacios porosos de la roca (su salinidad, por ejemplo).
- Conductividad de los granos minerales (en la mayoría de los casos es un factor mucho menos importante en comparación con los dos anteriores).

Por lo tanto, a mayor porosidad total, y por tanto mayor contenido en agua, menor resistividad. El aumento de salinidad del agua de formación también disminuye la resistividad.

Los materiales sólidos que constituyen la matriz de las rocas son infinitamente resistivos a no ser que contengan minerales conductores como son los sulfuros metálicos, los metales nativos o minerales arcillosos.

✓ Resistividad del Fluido

Mide la resistividad del fluido que rellena el sondeo. La medida se realiza con una sonda que dispone de un resistímetro/conductímetro adaptado para medir en el lodo. La unidad de medida es $\text{ohm} \times \text{m}$. En general este tipo de registro se obtiene durante el

recorrido de descenso de la sonda, para no perturbar las condiciones estabilizadas del lodo.

Permite determinar el contenido de sales disueltas en el fluido que rellena el sondeo por lo que tiene aplicación, si las circunstancias en las que se efectúa la medida son adecuadas, para conocer la calidad del agua de los acuíferos atravesados por el sondeo en un momento dado, así como su evolución en el tiempo. En combinación con otros registros permite detectar zonas de fracturas (Cruz, 1997).

- Interpretación cuantitativa de los perfiles de resistividad

Los registros de resistividad permiten determina el factor de formación, F , que se define como la relación que existe entre la resistividad de una roca y el fluido que alberga en sus poros (González, 2012):

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{R_{xo}}{R_{mf}}$$

Donde :

R_0 : es la resistividad de una formación limpia (aquella que no contiene arcilla en una cantidad apreciable).

R_w : Resistividad de la solución con la cual está saturada la formación.

F : constante de proporcionalidad.

Cuando la saturación de agua es del 100%, la resistividad verdadera de la formación, R_t es igual a R_0 .

El factor de formación es una función de la porosidad, ϕ (fracción del volumen total ocupado por poros o espacios vacíos), de la estructura poral y de la distribución de poros por su tamaño. Teniendo esto en cuenta, Archie propuso la fórmula:

$$F = \frac{a}{\phi^m}$$

Donde:

m : es un factor que depende de la cementación

a : constante.

✓ Registro Rayos Gamma.

El registro de rayos gamma es una medición de la radiactividad natural de las formaciones. Cuando no existen isótopos de la familia del Uranio, la radiación gamma se debe fundamentalmente al isótopo radiactivo del Potasio que es el Potasio 40. Este elemento se concentra mayoritariamente en las arcillas por lo que las formaciones con alto contenido en estos materiales serán las que den valores más altos de radiactividad natural. Sin embargo una arena puede dar un pico alto de radiación gamma si contiene feldespatos potásicos, micas, glauconita o minerales del Uranio.

La principal aplicación de este registro es la identificación cualitativa de la litología pues define los contactos entre materiales y permite realizar buenas correlaciones estratigráficas; desde el punto de vista cuantitativo permite determinar el contenido de arcilla en cada punto medido mediante una función de transformación a partir del Índice de Rayos Gamma (GRI) o Índice de Arcillosidad (González, 2012):. Este índice GRI es:

$$GRI = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$

Donde

GR: es la lectura del registro

GR_{min}: es la radiación mínima medida correspondiente a una arena limpia

GR_{max}: es la radiación máxima medida correspondiente a una arcilla pura

La función de transformación mencionada depende del grado de consolidación de la formación y de las condiciones locales de manera que para sedimentos sin consolidar el volumen de arcillas será:

$$V_{sh} = 0,083 \times [2^{3,7 \times GRI} - 1]$$

Para sedimentos consolidados:

$$V_{sh} = 0,33 \times [2^{2 \times GRI} - 1]$$

Correcciones y limitaciones

Se puede hacer tanto en sondeos entubados como desnudos y el valor obtenido depende factores tales como:

- Tipo y tamaño del detector
- Velocidad de registro
- Diámetro del sondeo y posición de la sonda
- Densidad del lodo

✓ Registro Neutrónico.

Para realizar el registro, una fuente radiactiva colocada en la sonda emite continuamente neutrones de alta energía (neutrones rápidos) que al encontrarse con núcleos del material de la formación, chocan elásticamente (como bolas de billar) y en cada colisión pierden parte de su energía convirtiéndose en neutrones termales o epitermales (más lentos, su energía se debe a la temperatura). La cantidad de energía perdida por un neutrón en cada colisión depende de la masa relativa del núcleo con el cual choca. El registro neutrón se utiliza fundamentalmente para conocer la situación de las formaciones porosas y determinar su porosidad.

No todas las formaciones contienen la misma cantidad de hidrogeno; por ejemplo las lutitas tienen mayor contenido de hidrógeno que las arenas, debido a su alto contenido de agua. En consecuencia, un contraste de valores en la curva neutrón indicará un cambio de litología. Valores altos de este registro indican baja porosidad y viceversa.

✓ Registro de Densidad.

Consiste en que una fuente radiactiva, generalmente de Cesio 137 que va acoplada a la sonda, emite rayos γ de mediana energía. Estos rayos chocan contra los electrones de la formación y en cada choque el rayo γ cede algo de energía al electrón y continúa su trayectoria con menor energía.

El valor obtenido dependerá del número de electrones contenidos en la unidad de volumen de la roca y este número es directamente proporcional a la densidad de dicha roca. Este registro permite determinar la densidad de la formación y su porosidad

✓ **Registros Sónicos.**

Consiste en medir el tiempo que tarda una onda sonora en atravesar una longitud definida de formación y es función de la composición de la formación, de su porosidad y del fluido que contiene. Los equipos estándar se basan en la medición del tiempo de llegada (tiempo de tránsito) de las ondas de compresión a los receptores midiendo el lapso de tiempo que transcurre entre la llegada de las ondas de un receptor a otro, es decir, el tiempo necesario para que la onda atravesase un tramo de formación igual a la distancia entre los receptores.

La porosidad disminuye la velocidad del sonido en las rocas matrices (el líquido o el gas presente en los poros propaga el sonido a una velocidad mucho menor que las rocas) y, por tanto, aumenta Δt . Conociendo la litología (y, por tanto, el tiempo de tránsito a través de una determinada matriz) el perfil sónico permite hacer una medida cuantitativa de la porosidad de una formación a partir de las velocidades sónicas de la matriz rocosa y del fluido.

✓ **Medidores de Tasas de Flujo (Flowmeter).**

Registra de forma continua la velocidad vertical del flujo de agua en un sondeo. El Flowmeter de hélice consiste en un medidor de caudal (mecánico-eléctrico) que es introducido en el sondeo a una velocidad constante mientras se bombea, de manera que el agua fluye a su través y mueve una hélice cuyo número de revoluciones se transmite a través del cable del sondeo y es registrado continuamente en relación a la profundidad (el registro se hace al ir descendiendo la sonda). Permite localizar los niveles productivos y estimar su caudal relativo de manera que se puede llegar a conocer la aportación de cada uno de estos niveles a la producción total de una secuencia de capas atravesadas por un sondeo.

✓ **Caliper (calibre)**

Es una herramienta que mide el diámetro de la perforación o del entubado. El *caliper* no proporciona información cuantitativa pero revela la presencia de zonas cavernosas o desmoronadas y de estrechamientos del sondeo por arcillas que hinchan o por costras de lodo depositadas en la pared del sondeo frente a tramos permeables.

Parámetros obtenidos mediante la interpretación de registros.

REGISTRO	INFORMACIÓN
Potencial Espontáneo (SP)	Detectar capas permeables, Resistividad del agua de formación (RW),
Resistividad de la Formación	R de la zona invadida. R de la zona virgen. Factor de formación. Límites entre diferentes litologías
Resistividad/ Conductividad y Temperatura del fluido	R/C y T ^a del agua procedente de los diferentes niveles de un acuífero Identificación de acuíferos Aportes de aguas de diferentes T ^a Gradiente geotérmico
Gamma Natural (GR)	Contenido de arcilla Límites entre litologías Diferenciar litologías porosas de no porosas Estimar tamaño de grano
Neutrón	Porosidad/Identificación de zonas porosas Identificación de litología
Densidad	Porosidad Espesor de costra de lodo Densidad del fluido Fluidos presentes en la zona investigada
Sónico	Cavidades, fracturas o derrumbes. Velocidad del sonido en la formación Porosidad Límites entre litologías
Flowmeter	Localización de tramos productivos y estimación de su caudal

Tabla 1. Información obtenida de los registros.

5.2. Sondeos.

La Compañía General de Sondeos S.A. (CGS) llevó a cabo la perforación de cuatro sondeos de investigación: dos pozos de bombeo PB-1 y PB-2 y un pozo de observación para cada uno de los pozos de bombeo, PZ-1 y PZ-2 durante los años 2007 y 2008. Este estudio se realizó con el fin de mejorar el abastecimiento de agua en la zona central de Asturias.

En este proyecto se pretende analizar la información de registros geofísicos medidos en los pozos, con el fin de identificar los posibles acuíferos prospectivos.

En la siguiente tabla se resume los trabajos de testificación realizados en los sondeos así como la profundidad final alcanzada en cada uno de ellos. En los Anexos se muestran algunas fotografías de los trabajos de perforación y de toma de registros.

Pozo	Profundidad (m)	Método de Perforación	Acuífero Investigado	Registros medidos	Toma de testigos	Coordenadas UTM		
						X	Y	Z
PB-1	445	Rotación a circulación inversa	Superior Cretácico	gamma natural, resistivos, potencial espontáneo, temperatura,	No	278.769,36	4.808.500,47	170,4
PZ-1	427	Rotopercusión	Superior Cretácico		No	278.785,15	4.808.528,51	170,7
PB-2	655	Rotación a circulación	Superior e Inferior Cretácico	(gamma natural, resistivos, potencial espontáneo, temperatura, sónico, neutrón, caliper flowmeter, resistividad del fluido de perforación)	No	278.740,16	4.808.512,71	170,4
PZ-2	729,75	Rotación con extracción de testigo	Superior e Inferior Cretácico	gamma natural	Si	278.767,55	4.808.565,00	172,4

Tabla 2. Trabajos efectuados en los pozos [2].

5.3. Software de Simulación GEOTHECNICAL SOLUTIONS (GS).

El software de análisis de registros GS ha sido diseñado para un uso cómodo y sencillo, probado en una amplia variedad de condiciones geológicas durante más de una década con excelentes resultados. Cuenta con diversos tipos de correlaciones que permiten optimizar los cálculos de las propiedades petrofísicas derivados de los

[2] AcuaNorte. 2008 Informe: Mejora del Abastecimiento de Agua en la Zona Central de Asturias.

registros. Permite la elaboración de correlaciones de pozos, identificación y zonación de litologías, entre otras diversas funciones que se describirán a lo largo de la metodología.

Para poder visualizar los registros en el programa y realizar los análisis cuantitativos de diferentes parámetros se debe cumplir con una serie de procedimientos que se describirán a continuación con imágenes extraídas del demo de la herramienta.

Edición de Datos.:

Se comienza editando en el Menú **Data Entry** (Figuras 5 y 6) la siguiente información:

- Nombre del proyecto (Acuanorte_Tesis).
- Nombre y estado de los pozos, elevación de la mesa rotaria.
- Coordenadas geográficas UTM, latitudes y longitudes.

Luego se selecciona el archivo con la información de los registros que debe estar en formato (.LAS) y se asignan las curvas correspondientes (potencial espontáneo, gamma ray, neutrón, densidad, caliper, resistividad, sónico, y caliper).

Se editan los datos de cabezal de las diagrfias (Resistividad del lodo, densidad de la matriz, temperatura del lodo, diámetro del sondeo, etc).

The screenshot shows a software interface for adding a new well. The main form includes the following elements:

- New Well Name:** A text input field, currently highlighted in yellow.
- Well Status:** A dropdown menu set to "Unknown".
- Well ID # (optional):** A text input field.
- Elevation Fields:** "RKB Elevation above MSL" and "Ground Elevation above MSL" (with a note: "Enter Negative Water Depth Value Offshore").
- Depth Units:** Radio buttons for "Feet" (selected) and "Meters".
- Coordinates:** "Latitude" and "Longitude" fields with "Decimal" units. Hemisphere options: "North" (selected) and "South" for latitude; "East" (selected) and "West" for longitude.
- UTM Coordinates:** "X" (500000) and "Y" (1000000) fields, with a "Convert to Lat/Lon" button.
- Database Wells:** A list on the right showing 6 wells (WELL-1 to WELL-6) and a "Total = 6" indicator.
- Buttons:** "Save New Well", "Map Preview", and "Close".
- Help:** A question mark icon.
- Instructions:** A red text note at the bottom left: "To Add a New Well, you must enter a Well Name and non-zero Elevations and Lat/Lon coordinates. Well Names are always listed alphabetically for convenience, and are CASE SENSITIVE. So be consistent in your naming conventions, particularly with the first character in the Name."

Figura 5. Datos del pozo.

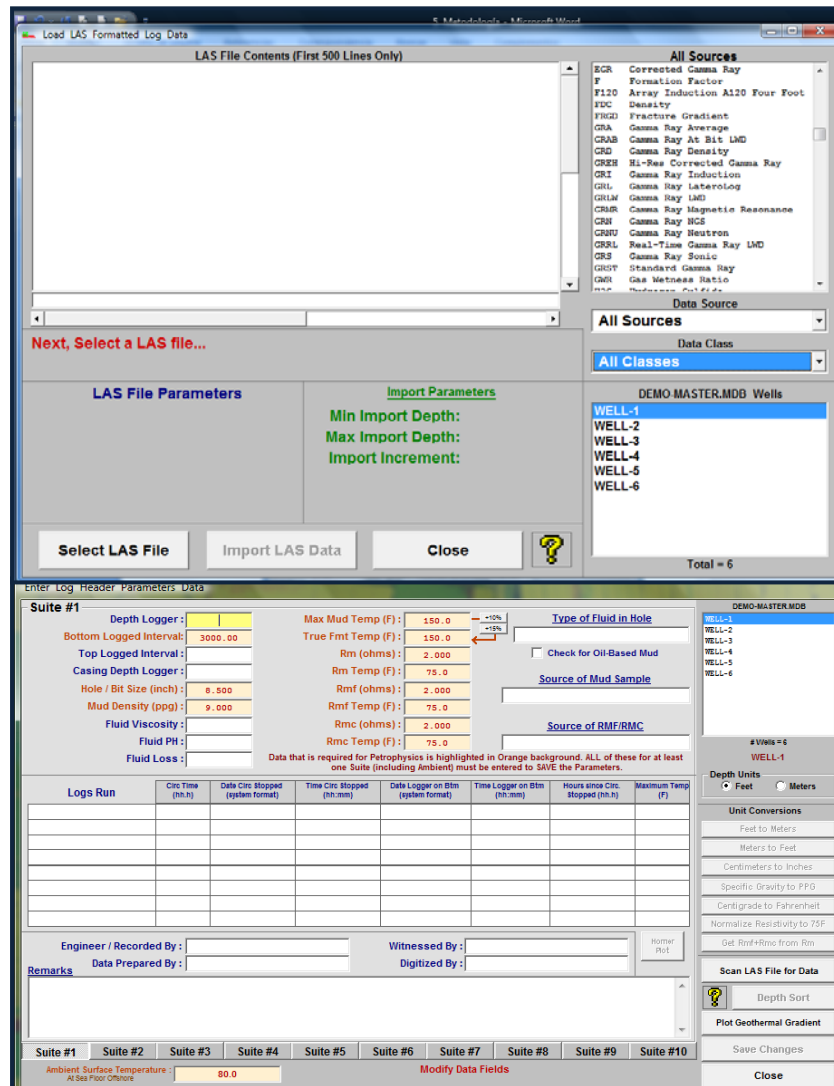


Figura 6. Edición de archivos y datos de cabezal del pozo.

Asignación litológica y correlación de pozos:

La herramienta tiene las bondades de facilitar la edición de las zonaciones que atraviesan los pozos y la litología presente en cada tramo de una manera sencilla tal y como se muestra en la figura 7. Se fija en primer lugar los datos del techo y muro de cada tramo y posteriormente se asigna el tipo de litología presente en la formación. La opción de correlación permite ajustar las profundidades de las formaciones de acuerdo a la respuesta del registro de gamma ray, y facilita una mejor visión en cuanto a las dimensiones de los horizontes de interés.

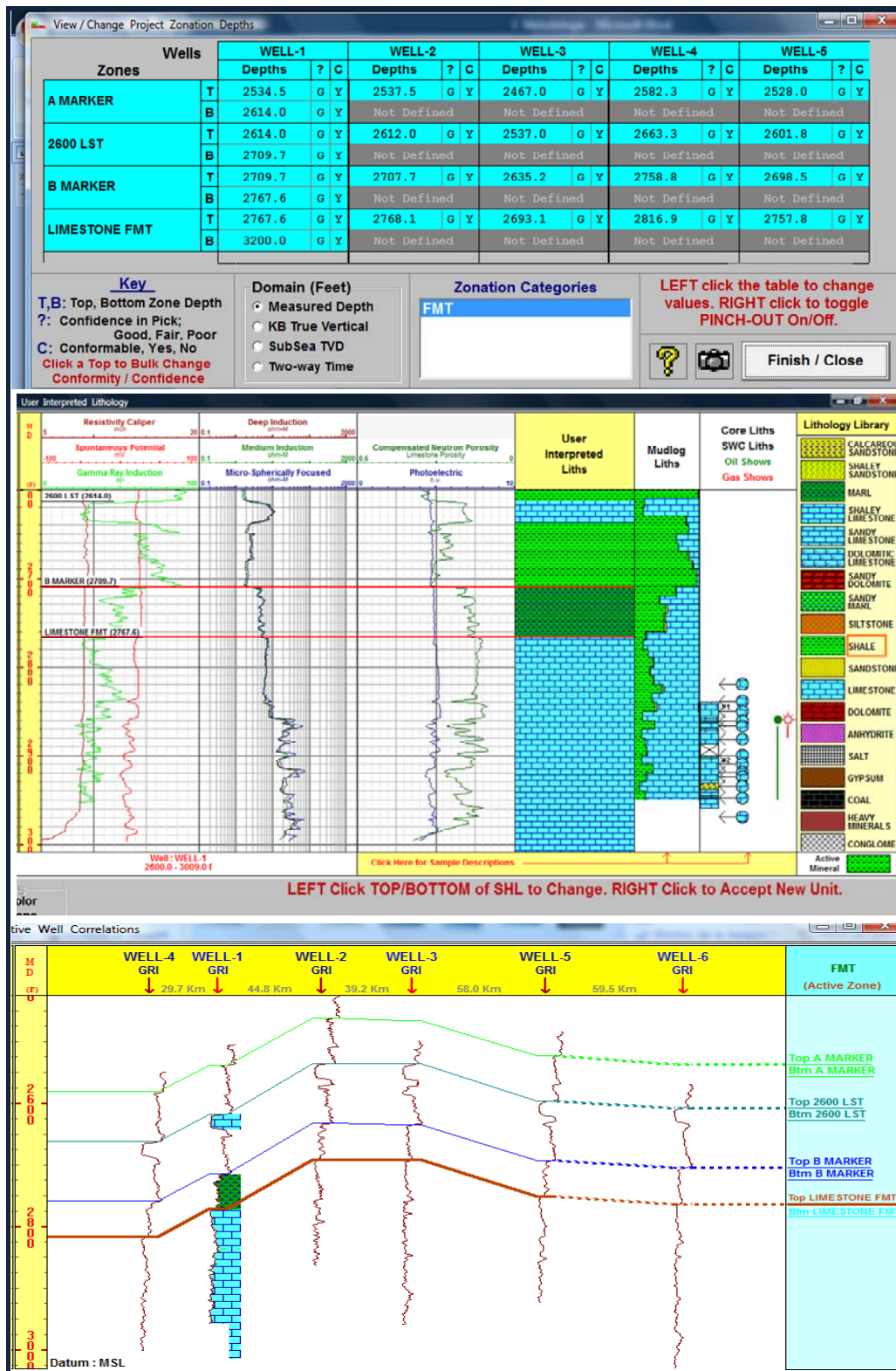


Figura 7. Datos de tramos litológicos y correlación de pozos.

Formato de Registros y correlación de pozos:

Se accede al menú de Log Viewing para definir las escalas de cada curva y formato que permita una mejor visualización de los registros (Fig.8).

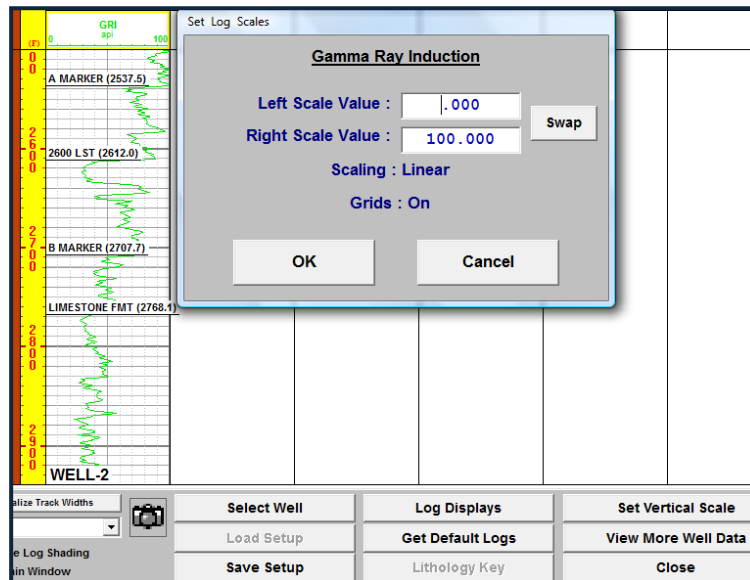


Figura 8. Formato de visualización de registros.

Corrección de Registros Gamma Natural y Potencial Espontáneo.

Con la herramienta GS se realiza la corrección de los registros Gamma Natural y Potencial espontáneo. Estas correcciones se deben en el caso del gamma a que los efectos derivados de la geometría del pozo, como son la densidad del lodo y las variaciones del diámetro de perforación a lo largo del sondeo, producen además del desplazamiento de esta línea base la atenuación de los valores registrados de emisión de gamma natural. Para la corrección de curvas gamma se utiliza el registro caliper. En el caso del potencial espontáneo las correcciones se hacen por las variaciones que puedan existir de elevadas viscosidades, densidad o concentración del lodo con la profundidad, debidas a fenómenos de decantación. La respuesta de las curvas después de las correcciones se mostrará más adelante en la sección de interpretación de registro.

Las ecuaciones y algoritmos utilizados por el software para la corrección de registros gamma y SP se muestran en los anexos.

Volumen de arcilla (Vsh).

El volumen de arcilla se determina a partir del gamma ray promedio, definiendo las líneas 100 % arena limpia y 100% de arcilla, la ecuación utilizada por el sistema es la de Índice de Rayos Gamma (GRI), señalada anteriormente (Fig.9).

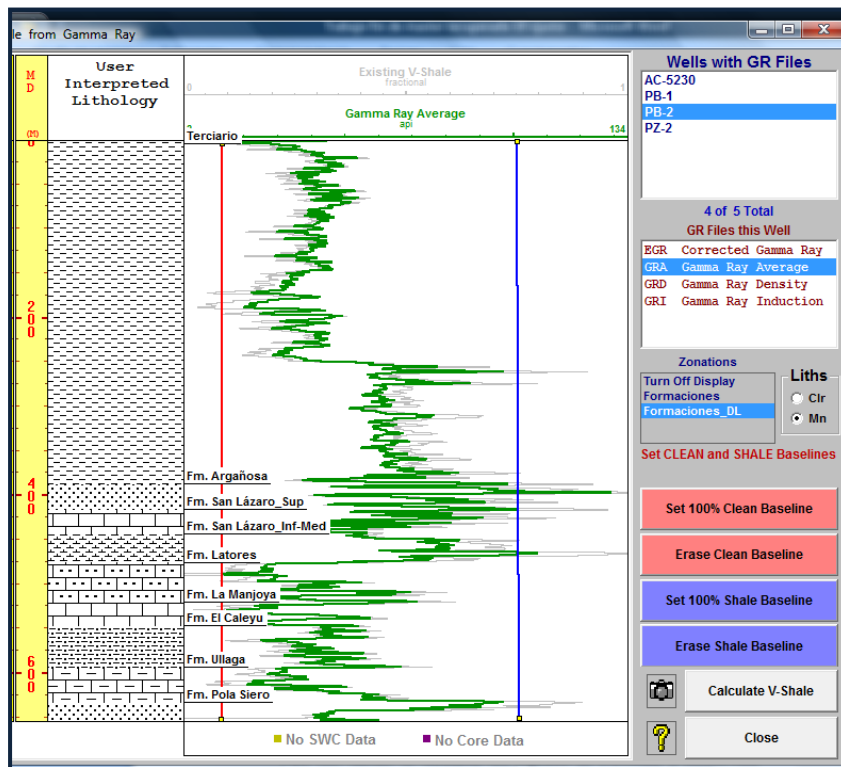


Figura 9. Cálculo del Volumen de arcilla.

Resistividad del agua de formación (Rwa).

Para este cálculo se utilizan los registros de Porosidad y Resistividad verdadera (Rt) (Fig.10). Las formula que emplea el software es la siguiente:

$$Rwa = \Phi^M * (Rt/A)$$

Donde:

M: exponente de cementación.

A: exponente de tortuosidad

Rt: Resistividad verdadera de la formación.

Rwa: Resistividad del agua de formación.

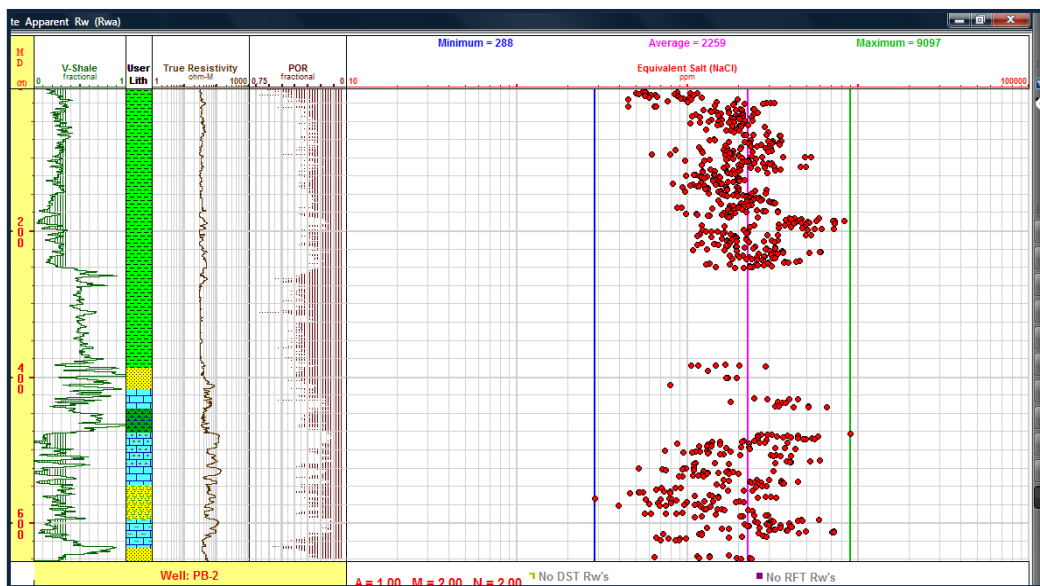


Figura 10. Calculo de R_w a 75°F.

Análisis petrofísico.

El análisis petrofísico consistió en determinar los parámetros de la roca (porosidad y permeabilidad) mediante la utilización de los registros de resistividad, neutrón, gamma y sónico, y ecuaciones aritméticas, para caracterizar cada una de las formaciones atravesadas por el sondeo.

Para ello se determinó en primer lugar los datos de R_{wa} , definiendo en el panel mostrado en la figura 11 una serie de correlaciones, métodos de cálculos y perfil adecuado para obtener datos confiables.

El software emplea numerosas ecuaciones para determinar la porosidad por cada tipo de registro, las cuales se mostraron en los . En el mismo formato que se obtienen del programa.

La permeabilidad puede determinarse por el registro de porosidad efectiva generado previamente o por el método de saturación de Willie Rose. Las ecuaciones para cada método se muestran a continuación:

- Permeabilidad por Porosidad:

$$K(md) = PC + \varphi^{PE}$$

Donde:

PC: Constante de Permeabilidad

PE: Exponente de Porosidad.

- Permeabilidad por Willie Rose:

$$K(md) = PC * \left(\frac{\varphi^{PE}}{Swirr^{SE}} \right) ; Swirr = \frac{PS}{\varphi}$$

Donde:

PC: Constante de Permeabilidad

PE: Exponente de Porosidad

SE: Exponente de Saturación Irreducible (Timur: 2; Morris-Biggs:2)

PS: Phi*Sw (Lo determina el programa mediante gráficos de Phi vs Sw)

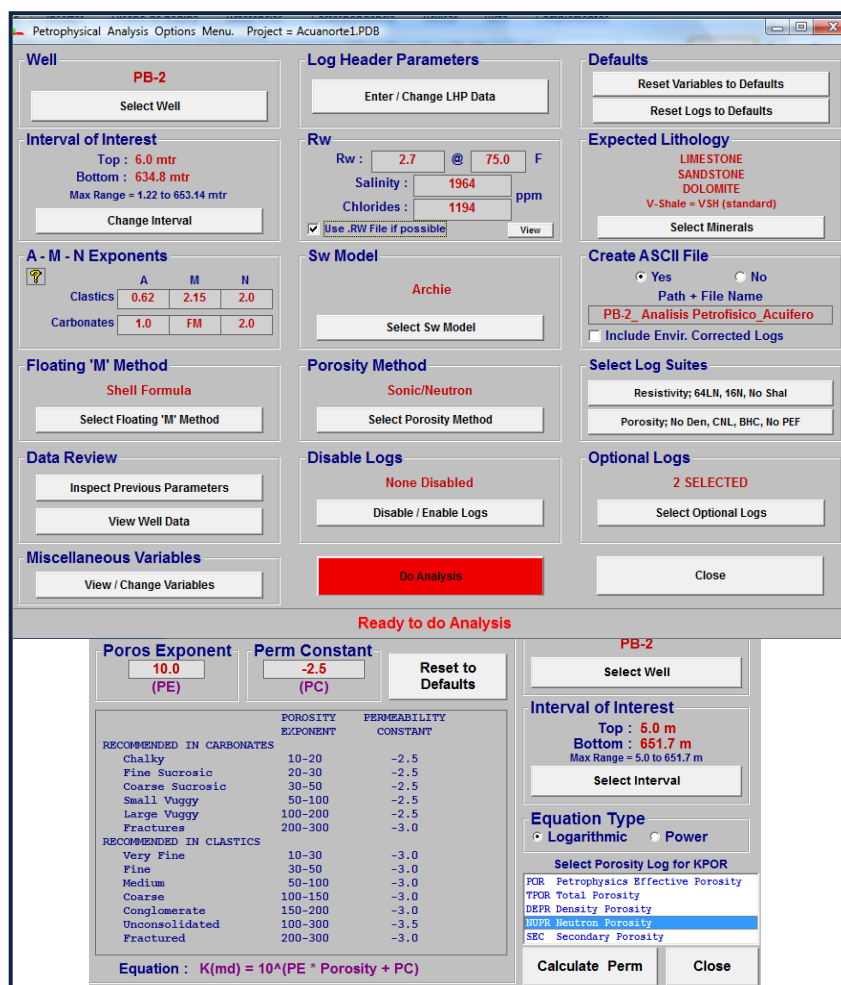


Figura 11. Panel de datos del menú análisis petrofísico y opciones de permeabilidad

6. Interpretación de Registros

6.1. Interpretación Cualitativa.

A continuación se realizará un análisis de los diferentes registros tomados en los pozos. Para este análisis solamente se incluirán el pozo PB-2, en el cual se pudieron realizar todos los registros hasta el fondo del sondeo, y el PZ-2 en el que sólo se pudo realizar la testificación completa en el tramo correspondiente al Paleógeno pero se cuenta con el testigo continuo extraído durante la perforación.

Las características de las curvas de los registros medidos en los sondeos PB-1, PZ-1, PB-2 y PZ-2 muestran comportamientos similares, lo que permitió una establecer una buena correlación entre ellos. Es importante mencionar que el techo y muro de cada tramo fue interpretado cualitativamente, correlacionando el comportamiento y tendencias de los registros y muestra una buena coincidencia con los contactos observados en la testificación litológica que permitió elaborar la columna estratigráfica (ver figura 4).

La interpretación de las curvas obtenidas para los pozos PB-2 y PZ-2 a la profundidad final alcanzada por los registros, se muestran en la figura 12. Posteriormente el análisis se hará por tramos hidrogeológicos y tipo de registro, comenzando por una breve descripción en la zona que va de 0 a 380 metros (Paleógeno) y donde finalmente se mencionaran las zonas de interés correspondientes al acuífero superior del Cretácico, al acuífero superior del Cretácico, al acuífero inferior del Cretácico.

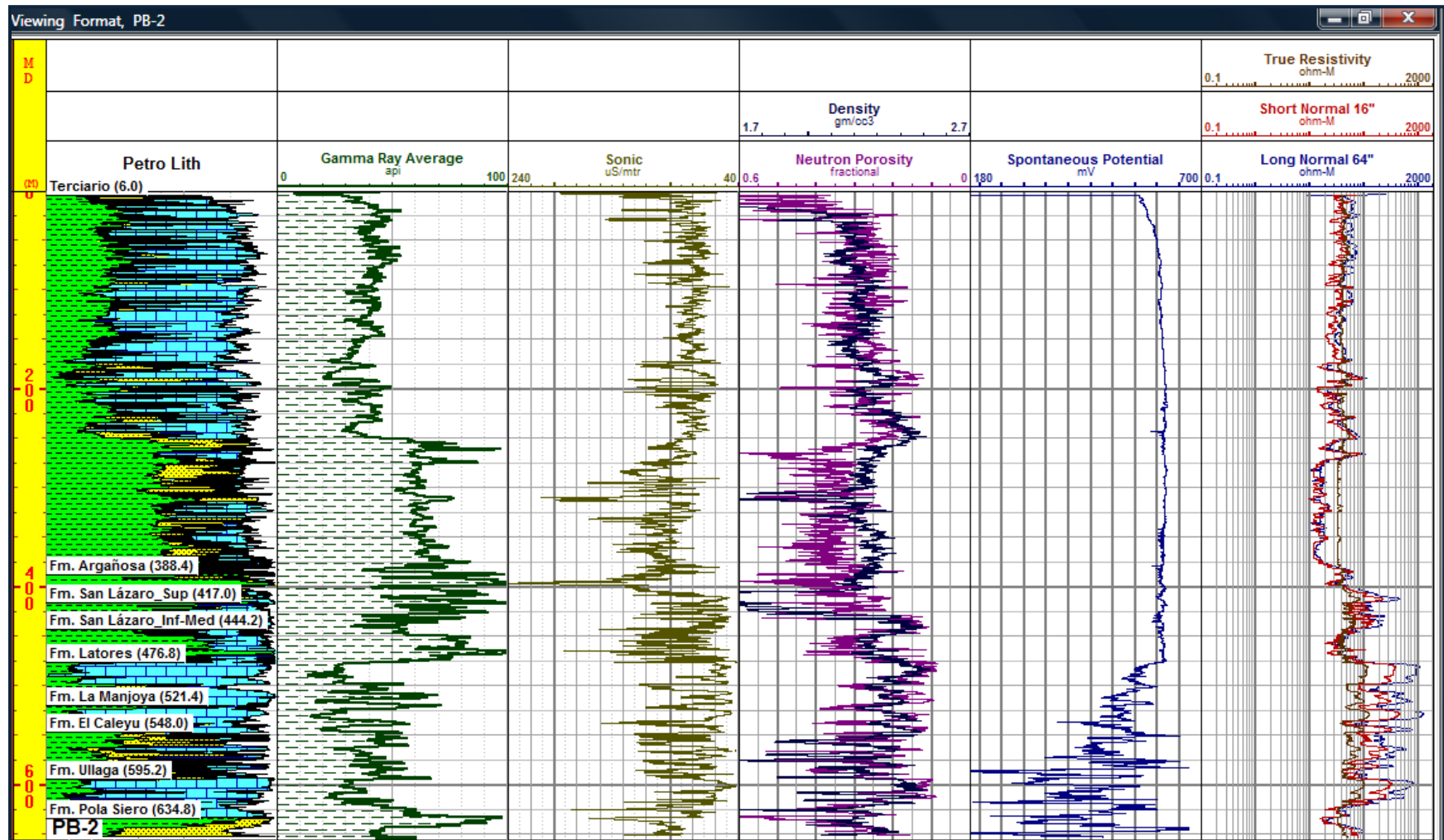


Figura. 12. Panel de Diagrafías del pozo PB-2 en todo el tramo investigado (Paleógeno y Cretácico).

Paleógeno (0 a 380 metros).

- Registro Potencial Espontáneo (SP).

En la figura 13 se muestra la curva del SP corregido en azul y en color rojo el SP sin corregir del pozo Pb-2. La curva azul mantiene la misma tendencia que la curva original. En las figura 19 y 20 se muestra la respuesta de las curvas para los pozos PB-2 y PZ-2. Observamos que la curva en el pozo PB-2 se mantiene en su línea de lutitas, es decir, sin variaciones significativas, indicativo de que se tienen formaciones arcillosas. La lectura es similar en el pozo PZ-2, registrándose solamente hasta la profundidad de 264 m.

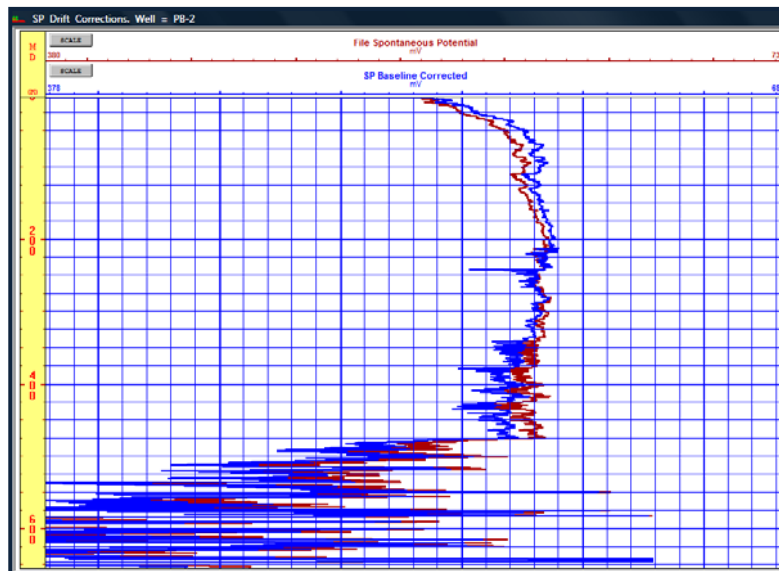


Figura 13. Curvas corregida potencial espontáneo.

- Registro Gamma Natural.

Para la obtención de una curva más confiable de rayos gamma se realizó la corrección por el diámetro del pozo, en la figura 14 se muestra en color verde la curva de Gamma Ray sin corregir y el sistema determina la curva en color rojo (Gamma ray corregido) para compensar los efectos del tamaño del pozo, para ello, el programa selecciona automáticamente el registro caliper, ya que éste contiene la información del tamaño del pozo. Se observa que no existe variación considerable entre las mismas, por lo que se puede inferir que la medición realizada no estuvo influenciada por el diámetro

del sondeo. Estas correcciones permiten obtener un volumen de arcilla más confiable que son de mucha influencia en la determinación de parámetros petrofísicos.

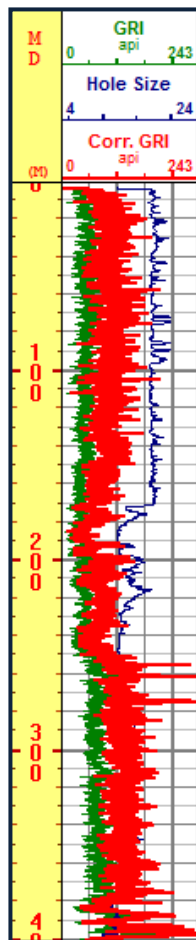


Figura 14. Curvas corregida gamma natural.

En este registro se tienen tres comportamientos diferentes en la curva de rayos gamma (Fig.15). Se suavizó la curva del Gamma Ray y se obtuvo una de Gamma Ray Average que muestra una tendencia más uniforme y de más fácil interpretación. Se puede apreciar que en el segmento de 0 a 150 metros, los valores oscilan entre los 30 y 50 °API, correspondiente a areniscas lenticulares (de grano muy fino) e intercalaciones de lutita. De 150 a 250 los valores de °API se ubican entre 20 y 30, que comprende niveles de calizas y margas de mayor espesor que las areniscas mencionadas anteriormente y que en este caso se encuentran en menor proporción. De 260 a 380 metros de profundidad se tienen valores de °API de 55 a 95, este horizonte presenta dos picos muy altos que se corresponden a intercalaciones de arcillitas, se encuentran también algunas capas de yeso y niveles areniscosos que se observaran más adelante a detalle al comparar la curva de gamma natural con la de densidad.

Como todos los pozos presentan curvas con comportamiento similares, en los análisis de los siguientes pozos, se hará énfasis solamente a las formaciones de interés y niveles de acuíferos.

En el registro del pozo PZ-2 se observa que los contactos de las formaciones presentan un desfase de profundidad por debajo de las profundidades del pozo PB-2 (Fig.16). Esto es debido a que se tiene un buzamiento de la serie hacia el norte y el pozo PZ-2 está ubicado a 61 metros al norte del PB-2.

- **Registro de Densidad.**

Este registro solo está disponible para el pozo PB-2. Las lecturas de las curvas oscilan entre 1,7 y 2,5 gr/cm³, con tramos de mayor densidad en las profundidades que van de 180 a 250 metros donde se encuentran algunas intercalaciones de calizas y margas y con dos picos muy bajos entre 300 y 350 metros correspondientes a dos lentes de arcilla. Estos datos eran de esperarse ya que el registro de densidad presenta bajos valores en tramos con altas porosidades y altos datos en zonas de baja porosidad. (Fig.15)

- **Registro de Resistividad.**

En este registro se identifican los mismos tramos que en la curva del gamma ray (Fig.15). Para el pozo PB-2 en el tramo que va de 0 a 170 metros las lecturas se mantienen constantes, a partir de 170 metros hasta 280 metros se tienen deflexiones continuas que indican leves incrementos en las resistividades como respuesta a los tramos menos arcillosos y más arenosos. En el tramo de 280 a 370 metros las curvas presentan una disminución en sus valores debido al aumento considerable de las arcillas. En el pozo PZ-2 solo se registró la resistividad hasta la profundidad de 264 metros (Fig.16). Se observa que de 0 a 180 metros mantiene un comportamiento similar al del pozo PB-2, con lecturas constantes, muestra dos lecturas altas a la profundidad de 178 a 203 metros, donde el gamma ray a su vez presenta los valores más bajos de 20 °API, lo que indica que se está frente a un tramo menos arcilloso y más calcáreo o arenoso.

- **Registro Sónico**

Registro disponible solamente para el pozo PB-2. Los valores altos de las lecturas del tiempo de tránsito a 310 y 330 metros corresponden generalmente a las zonas porosas (tramos arcillosos) y los bajos a aquellas que presentan baja porosidad 105 y 172 metros (calizas). (Fig.15)

- **Registro Neutrón.**

En el pozo PB-2 este registro presenta en general un comportamiento similar al Gamma Natural (Fig.15). Los picos más altos corresponden a los tramos (260, 275 y 311 metros) con más alto contenido de hidrógeno que en este caso está representado por los niveles lutíticos. Para el pozo PZ-2 se elaboró un registro neutrón sintético a partir de la curva gamma natural, para generar un registro de porosidad; Neutrón Porosity (Fig.16). La ecuación y escalas utilizadas se indican a continuación:

Escala Gamma Ray (GR): 0-100

Escala Neutrón Porosity: 0-0,55

$$\text{Sintético} = \text{GR (PB-2)} * (0,55 / 100)$$

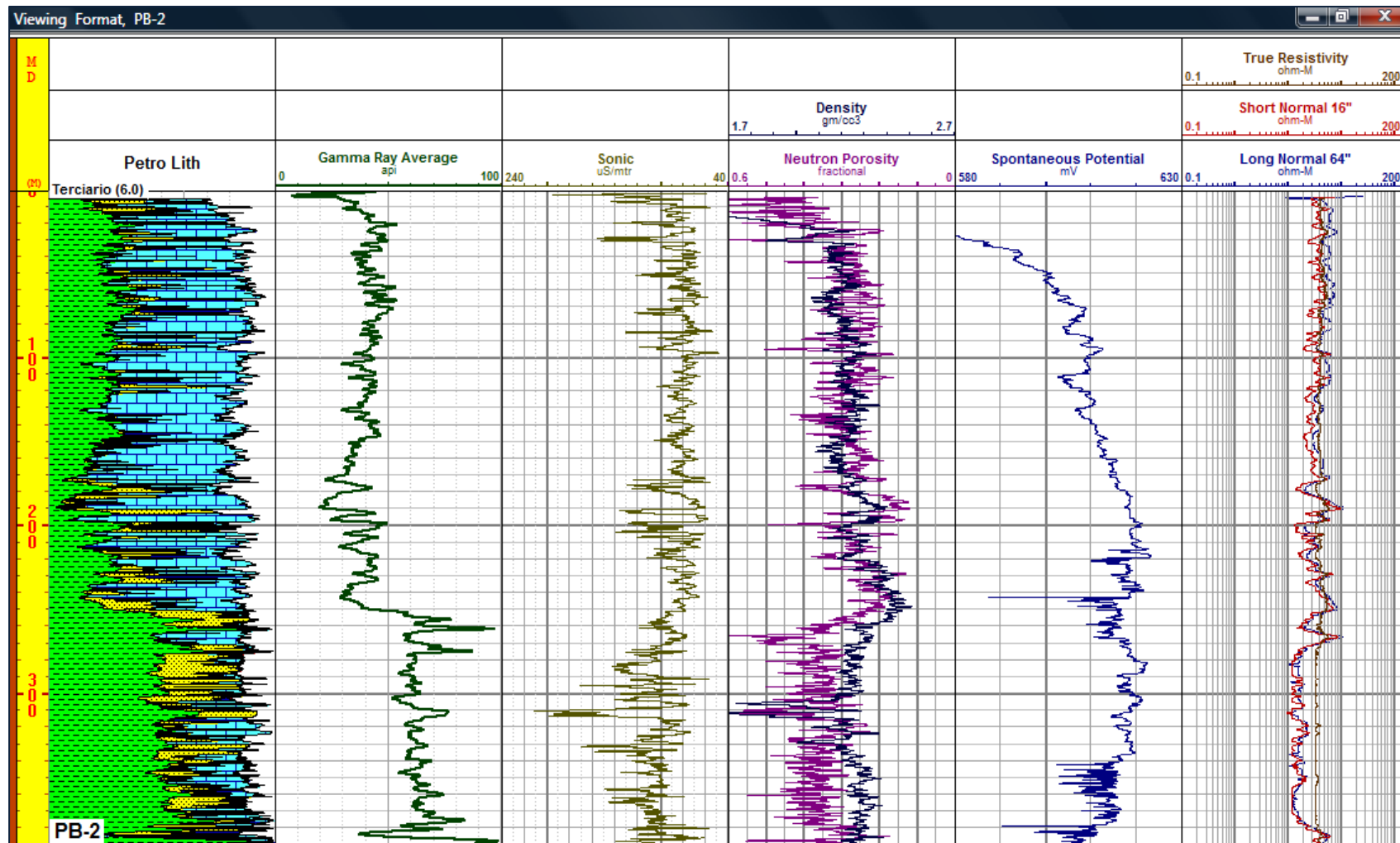


Figura 15. Registros del pozo PB-2.

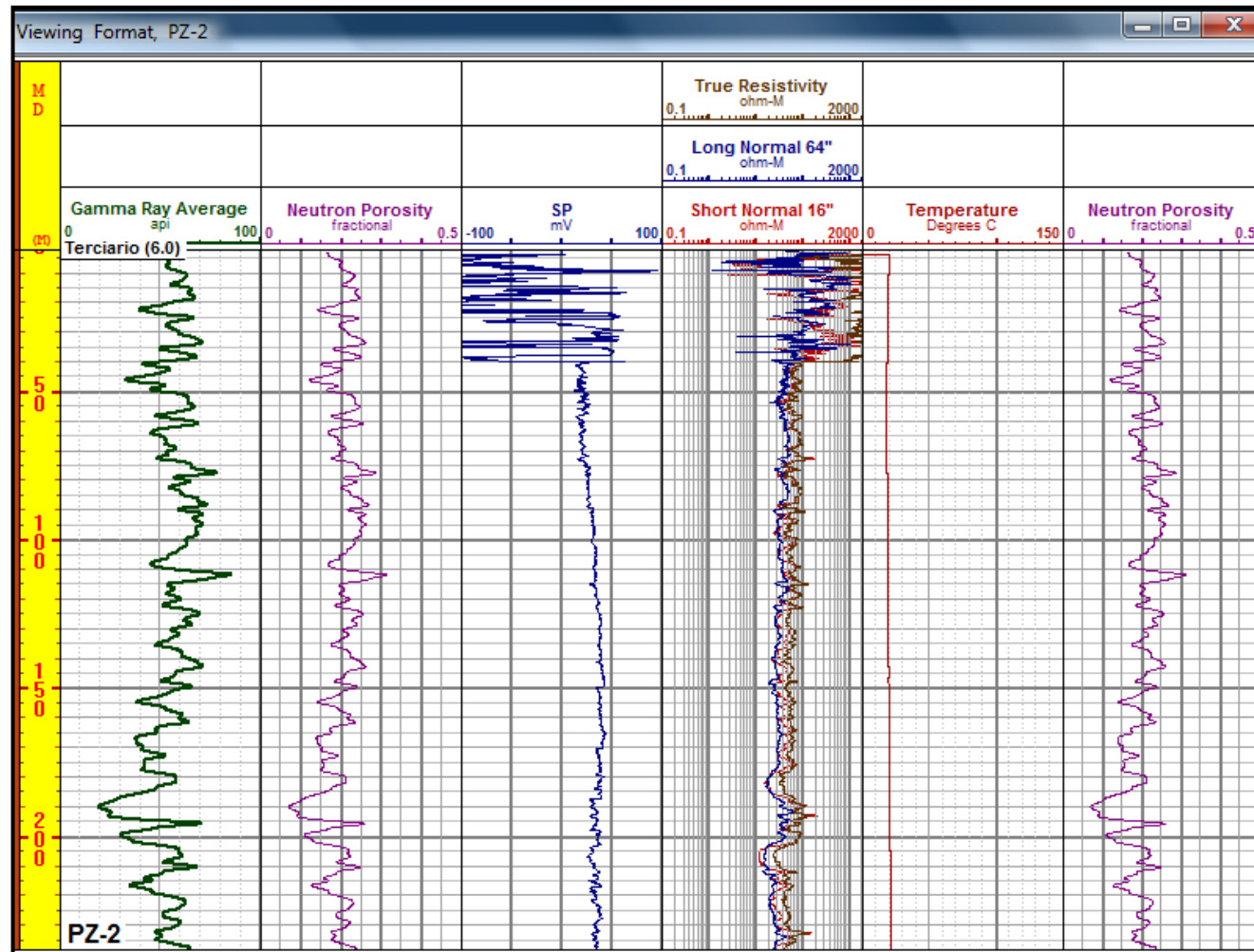


Figura 16. Registros del pozo PZ-2.

A continuación se interpretarán los tramos de interés correspondientes a los acuíferos y nivel de acuicludo, los cuales comprenden diferentes Formaciones tal y como se ilustra en la figura 21. El análisis se hará para el pozo PB-2, presentando todos los registros en una misma imagen (Fig. 17). Los registros del pozo PZ-2 se incluirán en los anexos.

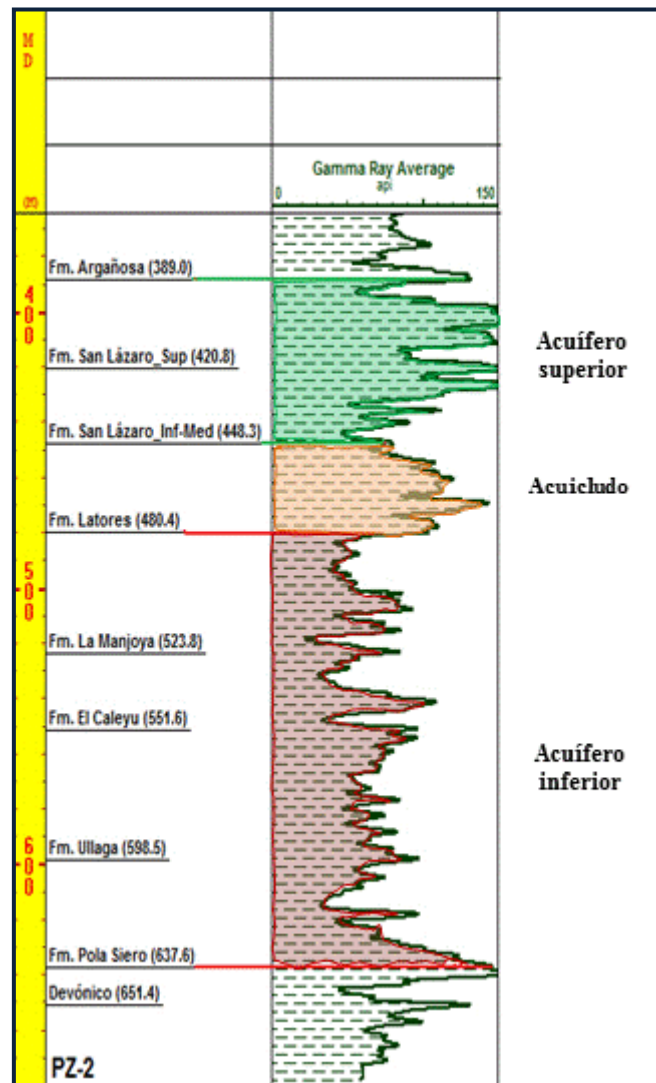


Figura 17. Acuíferos de Interés.

Acuífero superior del Cretácico (388 – 444 metros).

En la figura 18 se muestra además de los sondeos, la litología obtenida a partir del análisis petrofísico, aunque este punto se analizará más adelante, se incluye en este apartado para una mejor visualización de las curva y respuesta de cada uno de ellas ante las arcillas, calizas y areniscas.

Se tiene una alternancia de valores altos y bajos en los **Rayos Gamma**, indicativos de las intercalaciones de arcillas en la Formación Argañosa, En la Formación San Lázaro el comportamiento de los rayos gamma es similar aunque en este tramo se tienen menos areniscas y por ende valores más bajos de resistividad.

El **potencial espontáneo** se mantiene en la línea base lutítica, prácticamente sin deflexiones, característico de formaciones que contienen agua dulce.

Las **resistividades** presentan un comportamiento claramente diferenciado entre el tipo de material del Paleógeno y el comienzo del Cretácico (Formación La Argañosa), los valores se incrementan considerablemente debido a la presencia de tramos de areniscas y calizas menos arcillosas. El pico más alto va de 400 a 417 metros y corresponde a las areniscas de mayor espesor, donde la curva normal de 64" tiene valores mayores a la de 16" indicativo de que existe una leve o poca invasión de lodo en esas zonas, y que la resistividad del filtrado de lodo es menor a la del agua de formación.

El registro de **densidad** muestra una alteración en el comportamiento de las curvas a 405 – 430 metros, que puede deberse al desmoronamiento de las paredes del pozo durante los trabajos de entubado y engravillado y en los tramos inferiores a la karstificación de las calizas.

En el registro **sónico** se observa una deflexión muy alta que indica un aumento de tiempo de tránsito frente al lente de arcilla a 390 metros de profundidad con 8 metros de espesor.

El registro **neutrón** presenta un comportamiento similar al de rayos gamma y en particular picos altos de porosidad en el tramo de areniscas arcillosas, que va de 360 a 400 m. La variación de las lecturas corresponde a niveles con mayor o menor contenido de hidrógeno.

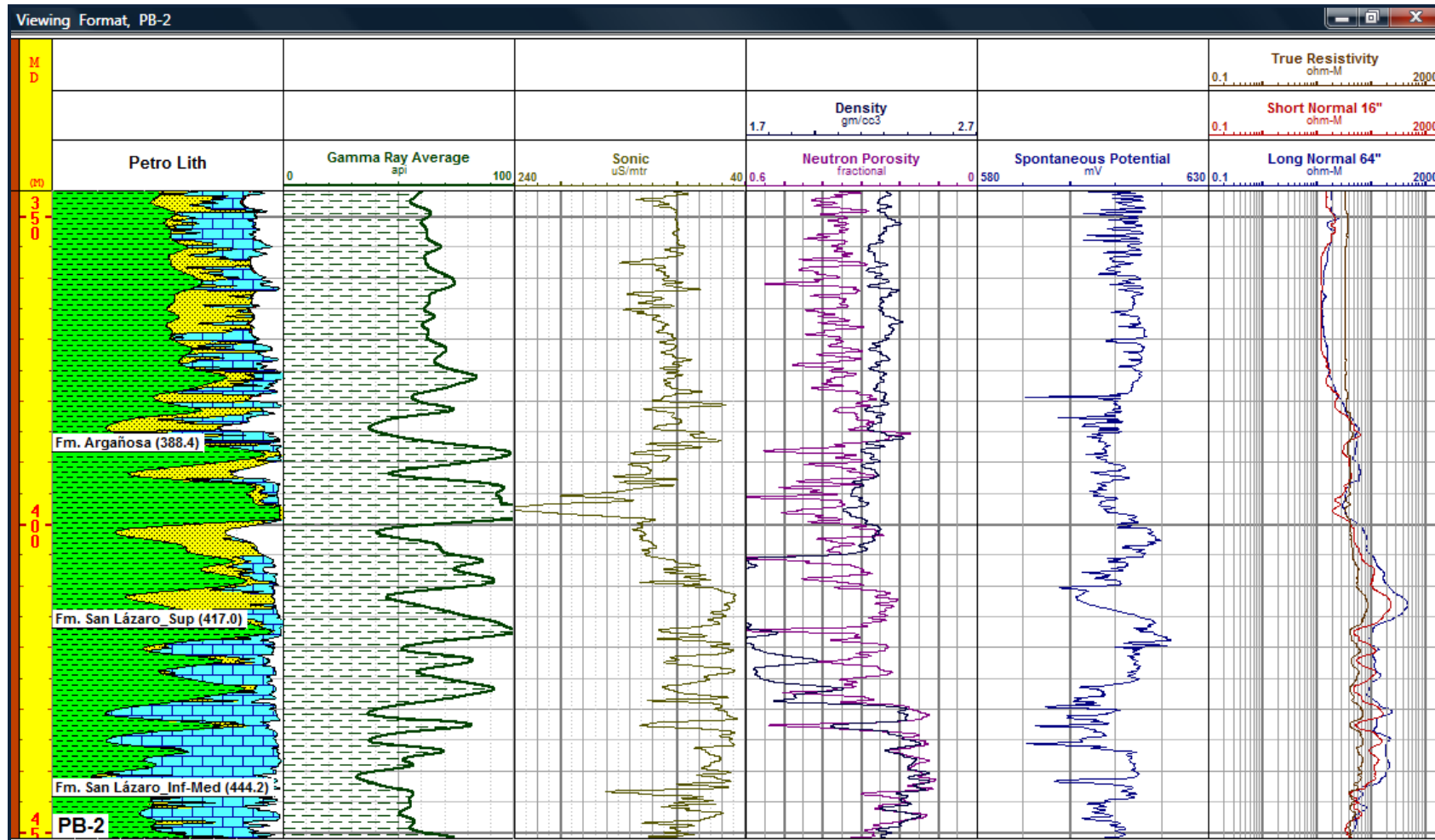


Figura 18. Conjunto de diagrfias del acuífero superior.

Acuícludo (444 – 477 metros).

En este tramo se observa el aumento marcado del **Gamma Ray** de 110 °API debido a la alta radiactividad del tramo arcilloso a 466 metros.

Las curvas de **resistividad** tienen una baja lectura lo cual corrobora la naturaleza arcillosa de la formación.

El **potencial Espontáneo** mantiene la línea base, con un comportamiento similar al de los tramos descritos anteriormente.

Los registros **neutrónicos** y de **densidad** presentan pocas variaciones, excepto en el pico de 470 metros donde se tiene un bajo valor, indicativo de formaciones lutítico-margosa, comprobado por la descripción litológica del pozo PZ-2 en esta zona.

El **sónico** presenta dos lecturas altas en los picos de 444 y 466 metros, lo cual es de esperarse en zonas porosas.

Este tramo constituye una buena barrera impermeable por su condición lutítico-margosa (Fig.19).

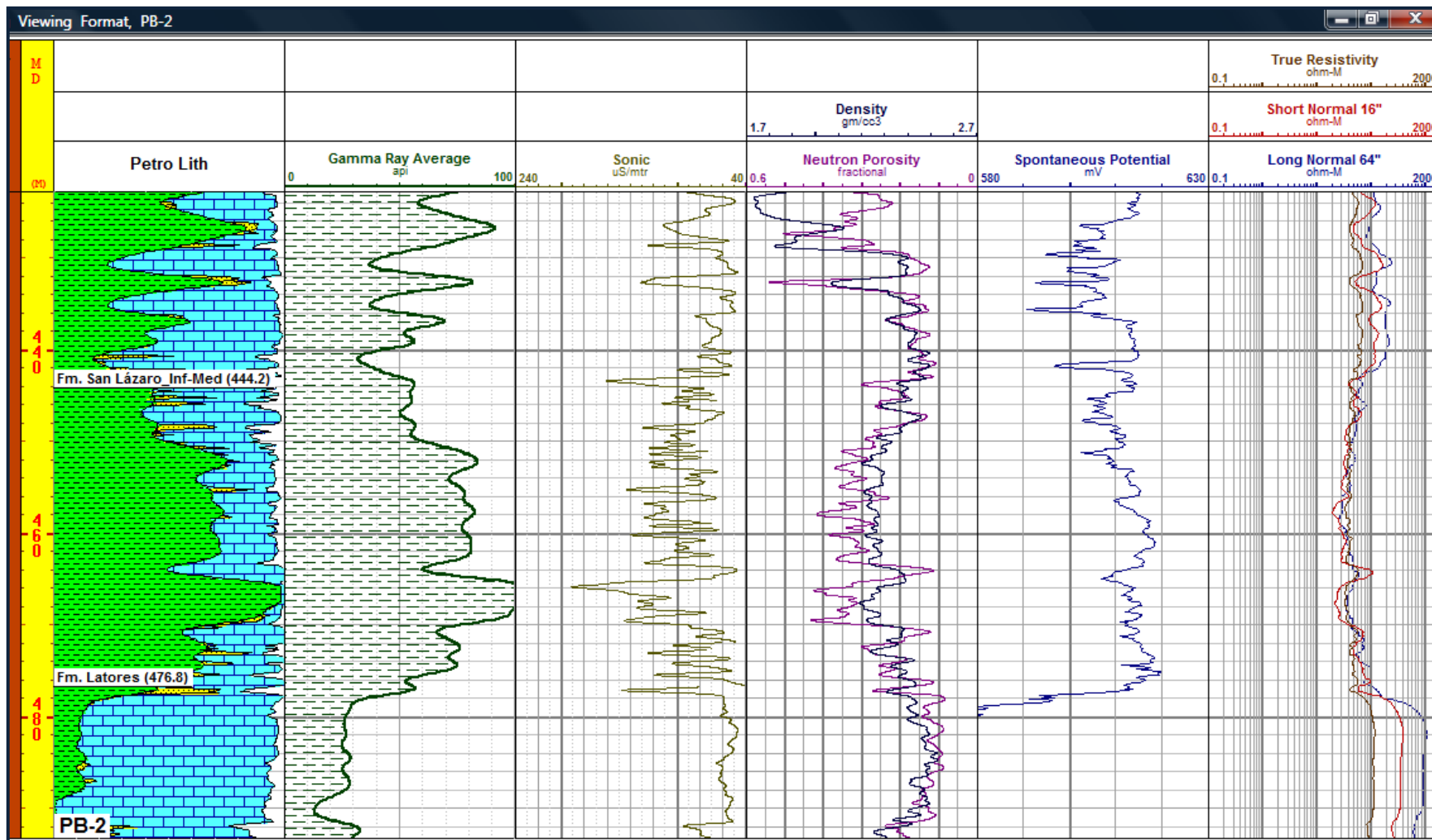


Figura 19. Conjunto de diagrafas en la sección del acuícludo.

Acuífero inferior del Cretácico (476 – 635 metros).

Este acuífero se caracteriza por presentar areniscas y calizas con espesores mayores a los estudiados anteriormente, las mismas se ubican a 500 y 548 metros de profundidad (Fig.20). La interpretación de los registros en este caso se hará por tramos ya que se tienen varias formaciones con características diferentes.

- Tramo 477 - 521 m (Formación Latores).

Litológicamente se trata de una formación de calizas arenosas, de **resistividades** altas con respecto a las lutitas, se tienen valores en la amplitud de las curvas que oscilan entre 10 y 2000 ohm-m en la caliza de 9 metros de espesor.

El comportamiento de la curva **gamma** indica un tramo limpio desde 477 a 500 m, con valores más bajos en las calizas que en las lutitas y similares a las lecturas del neutrón, La **densidad** aumenta considerablemente en este tramo homogéneo.

El registro **sónico** indica valores elevados de tiempo de tránsito, y por tanto alta porosidad, frente a las arcillas y bajos valores en calizas y areniscas, coincidentes con el registro gamma.

- Tramo 521 - 548 m (Formación La Manjoya).

Es una formación compuesta por calizas arenosas con valores muy bajos de **gamma natural**. En este tramo se tienen los valores más altos de **resistividad**. La **densidad** muestra una lectura alta de 2,48g/cm³ y el registro **sónico** con valores bajos característico en este tipo de formaciones.

- Tramo 548 - 595 m (Formación El Caleyú).

Compuesto por capas de areniscas e intercalaciones de calizas. La variación en los picos **gamma** indica un tramo con alternancia de capas que tiene un comportamiento similar al neutrón que permiten diferenciar los mismos lentes de areniscas y lutitas. Los comportamientos similares se deben a que la sonda neutrónica detecta los átomos de hidrógeno presentes en los materiales y en este caso los valores más altos corresponden a las arcillas, por su alto contenido en agua de constitución, y los menores a las areniscas, gravas limpias y calizas, tal como sucede con la sonda Gamma Ray.

Las **resistividades** varían entre 600 y 1600 ohm-m, valores menores que los registrados frente a las calizas de La Formación Manjoya. Los valores altos de **densidades** corresponden a los lentes de areniscas que a su vez ocasionan bajas lecturas del neutrón debido al bajo contenido de hidrógeno.

Se observa que la curva del **potencial espontáneo** presenta deflexiones hacia la derecha respecto a la línea base de las lutitas. En este caso observamos dos tramos lutíticos, uno a techo y otro a muro, que marcan la línea base de las lutitas y entre ambos un tramo carbonatado permeable que hacen que la curva de SP se desplace hacia la derecha, indicando que el agua del acuífero es más dulce que el del sondeo.

- **Tramo 595 - 635 m (Formación Ullaga).**

Compuesto por materiales similares a la Formación La Manjoya, calizas con areniscas delgadas, de ahí que se tengan más variaciones en las curvas del **gamma**. Se observa un progresivo aumento de la **resistividad** según el aumento del radio de investigación que va desde la curva normal corta 16" hasta la normal larga 64", esto es indicativo de que la resistividad del filtrado de lodo es menor que la del agua de formación dulce. El registro **SP** tiene un comportamiento similar al de la Fm. La Manjoya. Los registros **sónico**, **neutrón** y de **densidad** presentan un lectura pronunciada a 625 m correspondiente a un lente de arcilla que hace disminuir a 20 ohm-m la resistividad.

- **Tramo 595 - 635 m (Formación Pola de Siero).**

Presenta una disminución del valor de **resistividad** y aumento del **gamma** en el lente de arcilla que va desde 635 a 640 metros, lo que indica un tramo poco permeable. De 640 a 652 metros se tiene un tramo de areniscas de grano medio a fino que refleja valores bajos de gamma y más altos de resistividad que indican litología más permeable. El registro sónico presenta una alta deflexión hacia la izquierda situado frente al lente arcilloso, descrito anteriormente, ubicado en el techo de la Formación Pola de Siero. El registro neutrón también aumenta sus lecturas frente al tramo lutítico, debido a que tienen una porosidad total alta.

[1] Schlumberger. *Evaluación de formaciones* (en línea). 03 de Junio de 2013.

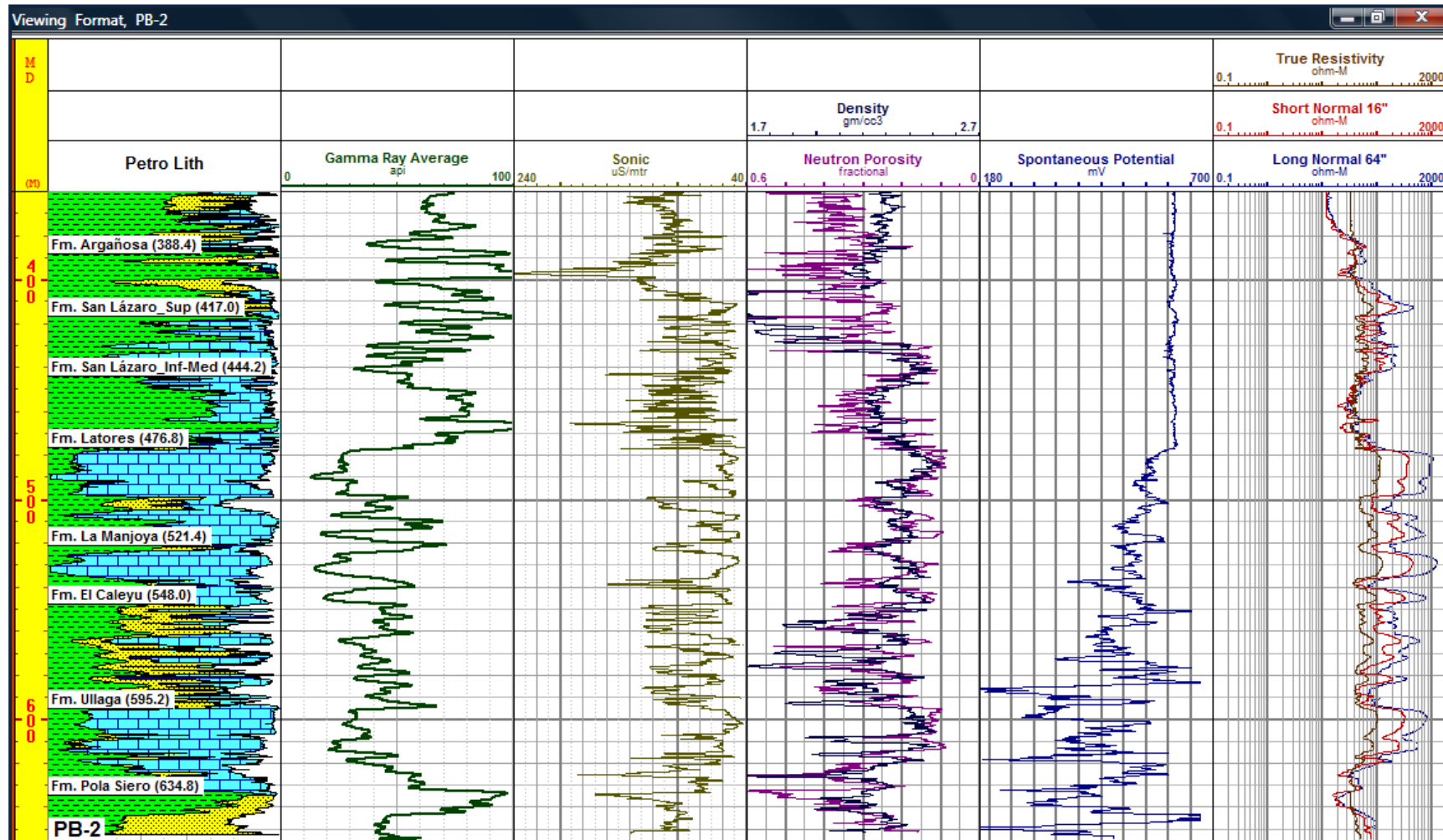


Figura 20. Diagramas en la sección del acuífero inferior.

A continuación se interpretan los registros caliper, temperatura y flowmeter para todo el pozo ya que las variaciones en pequeños tramos aportan menos información que si se hace en conjunto.

- **Registro Caliper y temperatura.**

En la figura 21 se observan varias desviaciones correspondiente a la primera profundidad de perforación alcanzada de 173 m, con un diámetro de 444.5 mm, posteriormente se terminó de perforar el pozo a 655 m, con un diámetro de 311,15 mm. En el registro se señalan dos puntos de desviación de la curva que puede deberse a que el tiempo de perforación fue un poco largo (42 días) y las formaciones arcillosas se vuelven inestables por la presión de sobrecarga, por lo que la arcilla se rompe y se deposita en el fondo del pozo. Esto puede originar pegas en la sarta de perforación debido a la arcilla hidro-presurizada que se acumula en el espacio anular del pozo. En otros casos este comportamiento se debe al tipo de formaciones poco o nada consolidadas como grava, arena, etc, y zonas fracturas.

La temperatura en este registro aumenta levemente a medida que se profundiza, pasando de 20°C a una temperatura final de 24 °C.

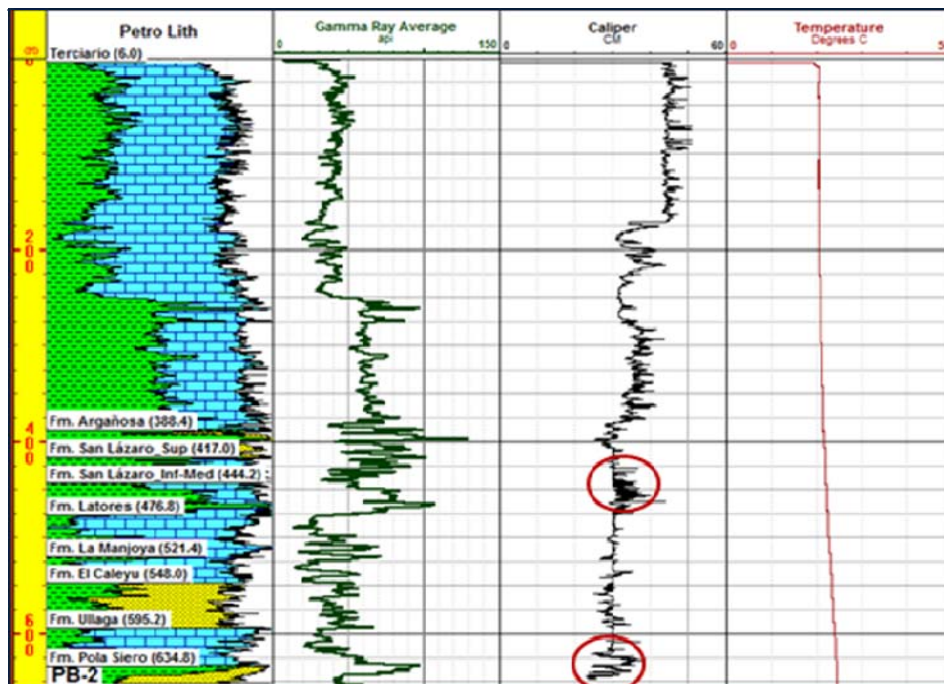


Figura. 21. Gamma Ray, Caliper y Temperatura del pozo PB-2.

- Registro Flowmeter.

En la figura 25 se muestra el registro de medidor de flujo para los pozos PB-1 y PB-2, donde se indican la aportación de agua por cada tramo.

En el pozo PB-2 se observa que las zonas con mayor aportación corresponden a la Formaciones Latores, El Caleyú y Pola de Siero, siendo estos los que presentan mayor contenido de areniscas y calizas.

En el pozo PB-1 se tiene que el 100% del fluido aportado durante el estudio corresponde a la Formación La Argañosa.

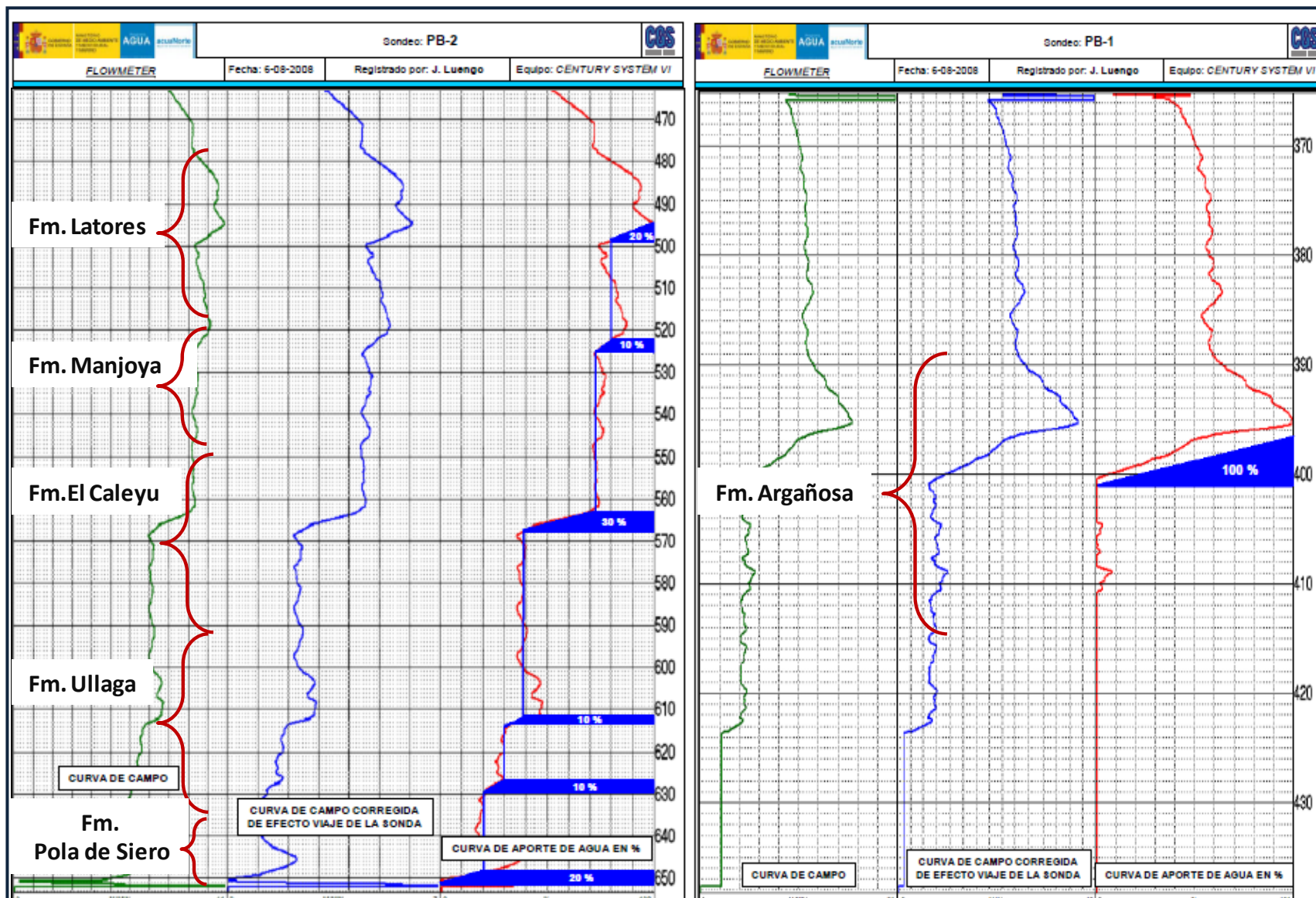


Figura 22. Panel del registro Flowmeter de los pozos PB-2 y PB-1.

6.2. Interpretación Cuantitativa.

Este análisis cuantitativo consistió en determinar en primer lugar el valor del volumen de arcilla y la resistividad del agua de formación y, en segundo lugar los parámetros hidrogeológicos (porosidad y permeabilidad).

- Volumen de arcilla (Vsh).

De la curva del volumen de arcilla obtenida mediante la ecuación del Índice de Arcillosidad (ver apartado de metodología), se seleccionaron los techos y muros de las zonas de interés para obtener un promedio por formación y por acuífero.

El acuífero superior presenta un promedio de 59 % de volumen de arcilla en el pozo PB-2, el acuífero actúa como barrera o sello entre los dos acuíferos, por tal razón tiene el mayor valor de arcilla de un 65 %. Estas dos zonas presentan los picos más altos en la curva de rayos gamma que evidencia el contenido arcilloso (Fig. 23). En el acuífero inferior los porcentajes son de 25 y 31 % de arcilla para los pozos PB-2 y PZ-2 respectivamente.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de Vsh expresado en %.

		PB-2		PZ-2		PB-1		AC-5230	
		Vsh (%)	Prom.	Vsh (%)	Prom.	Vsh (%)	Prom.	Vsh (%)	Prom.
Acuífero Superior	Fm. La Argañosa	67	59	59	52	67	57	45	45
	Fm. San Lázaro Sup.	50		45		46		44	
Acuífero	Fm. San Lázaro Inf. y Med.	65	65	49	49			40	40
Acuífero Inferior	Fm. Latores	21	25	23	31				
	Fm. La Manjoya.	19		24					
	Fm. El Caleyú.	30		29					
	Fm. Ullaga.	29		33					
	Fm. Pola de Siero.	No Reg.		46					

Tabla 3. Datos de Volumen de Arcilla.

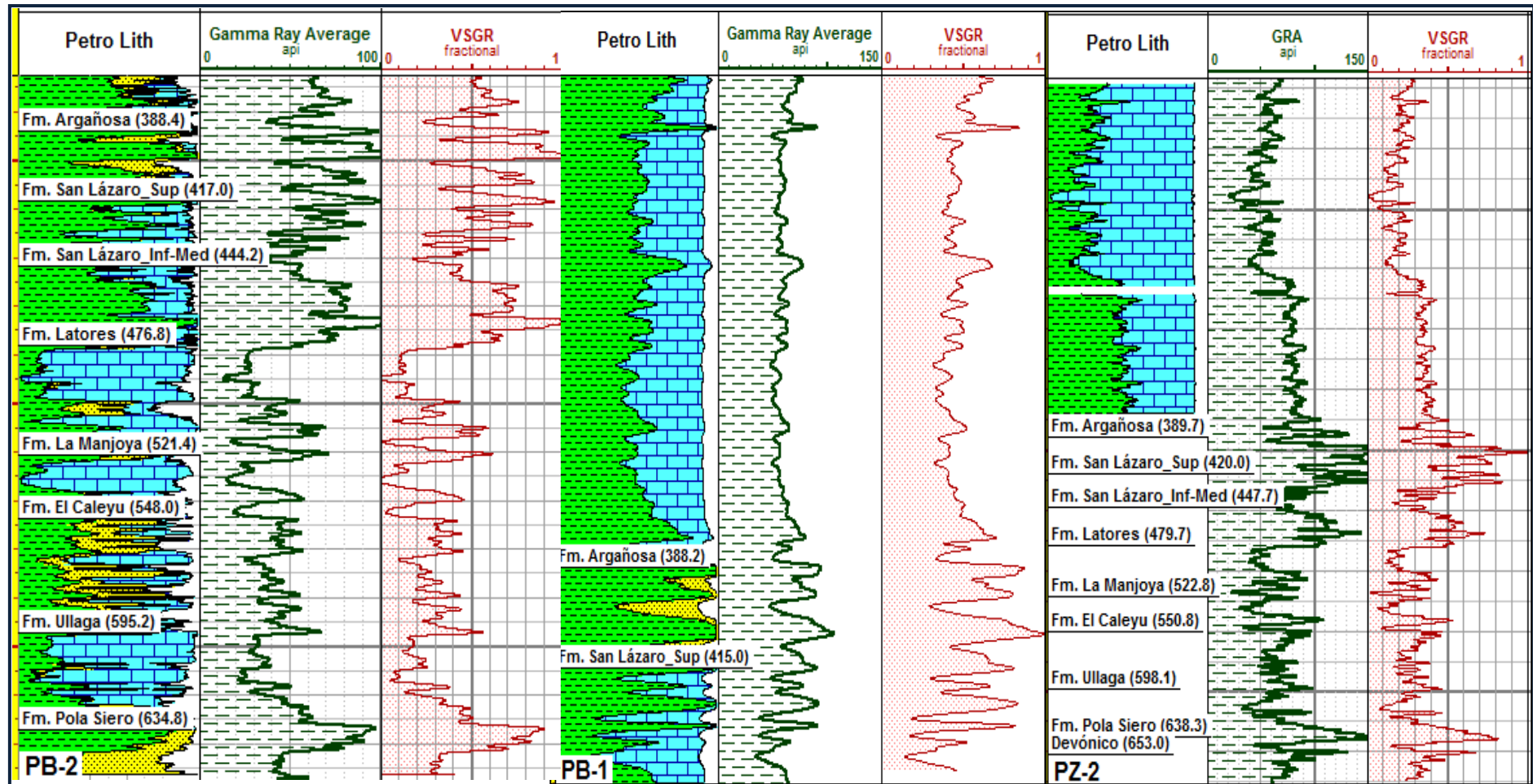


Figura 23. Curva de Volumen de arcilla para los pozos PB-2, PZ-2 y PB-1.

- Resistividad del agua (Rwa).

Para este cálculo se utilizó, la ecuación en función de la resistividad y porosidad, explicada en la metodología. Se obtuvo un Rwa de 2,7 ohms. Este parámetro es fundamental para el cálculo de las porosidades totales y efectivas que analizaremos en el siguiente apartado.

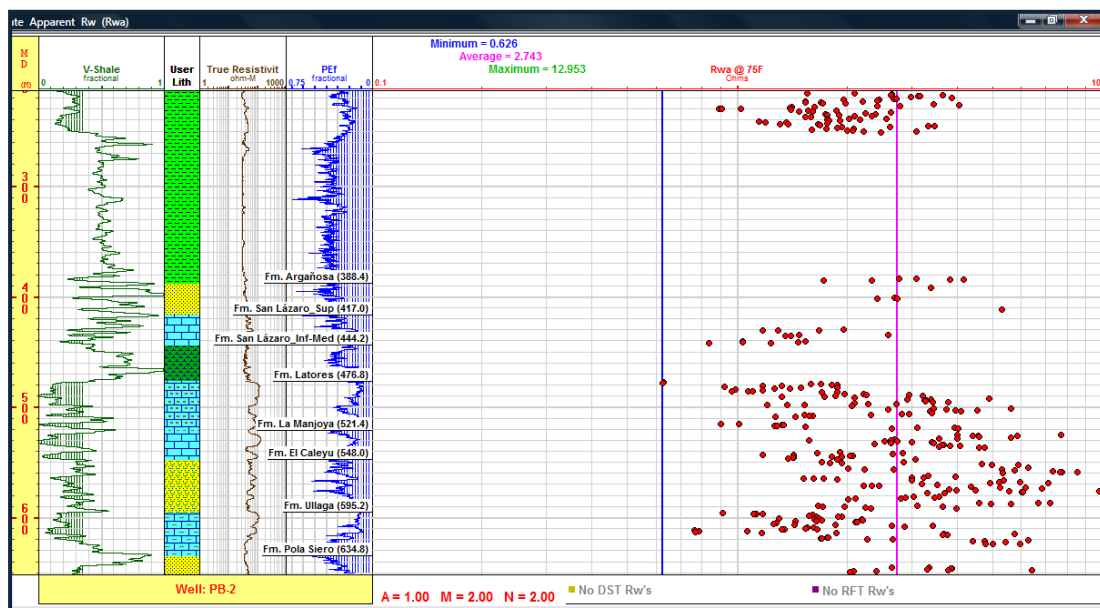


Figura 24. Calculo de Rwa a 24 °C

Los parámetros Petrofísicos obtenidos en este apartado (porosidad y permeabilidad), fueron determinantes para la caracterización de los acuíferos, a continuación analizaremos a detalle cada uno de ellos.

- Porosidad.

Para este cálculo fue necesario definir una serie de parámetros en el Menú de análisis petrofísico, asignando en primer lugar el volumen de arcilla promedio correspondiente a cada acuífero para así obtener valores ajustados en cada tramo. Se seleccionaron los registros Sónico y Neutrón ya que según la herramienta es la que mejor se ajusta en zonas carbonáticas y por recomendación del especialista de GS es el método que ofrece mejores resultados, adicionalmente las lecturas de las curvas presentan un comportamiento confiable y sin influencia de los condiciones del hoyo. Por último se asignó el valor de resistividad del agua de formación, determinada en pasos previos a este.

Se obtuvieron datos de porosidad únicamente para los pozos PB-2 y PB-1, ya que en el PZ-2 las curvas de resistividades solo alcanzaron la profundidad de 382 m, y en el pozo PZ-1 no se realizó ninguna testificación geofísica.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de porosidad efectiva para cada formación y por acuífero. Como se observa en la figura 25 las diferencias más altas entre porosidad total y efectiva se tienen en las Formaciones La Argañosa, Miembro Superior de la Formación San Lázaro y en el acuícludo (miembros inferior y medio de la Fm. San Lázaro).

El acuícludo presenta muy bajas porosidades efectivas, este tramo está compuesto por alto contenido de arcillas y calizas. Las arcillas presentan altos valores de porosidad total y bajos valores en porosidades efectivas. Además las calizas suelen tener porosidades efectivas menores a las areniscas.

El acuífero inferior tiene mayor porosidad que el superior, esto se debe a que se tiene menor contenido de arcilla y predominancia de areniscas.

En el pozo PB-1 se determinó el valor de porosidad solamente en la Formación La Argañosa que resultó ser de 12 %, similar al del pozo PB-2 (Fig.26).

		PB-2	PB-1
		\varnothing_e (%)	\varnothing_e (%)
Acuífero Superior	Fm. La Argañosa	15	12
	Fm. San Lázaro Sup.	8	12
Acuicludo	Fm. San Lázaro Inf. y Med.	4	
Acuífero Inferior	Fm. Latores	19	
	Fm. La Manjora.	10	
	Fm. El Caleyú.	18	
	Fm. Ullaga.	10	
	Fm. Pola de Siero.	13	

Tabla 4. Datos de \varnothing_e efectiva.

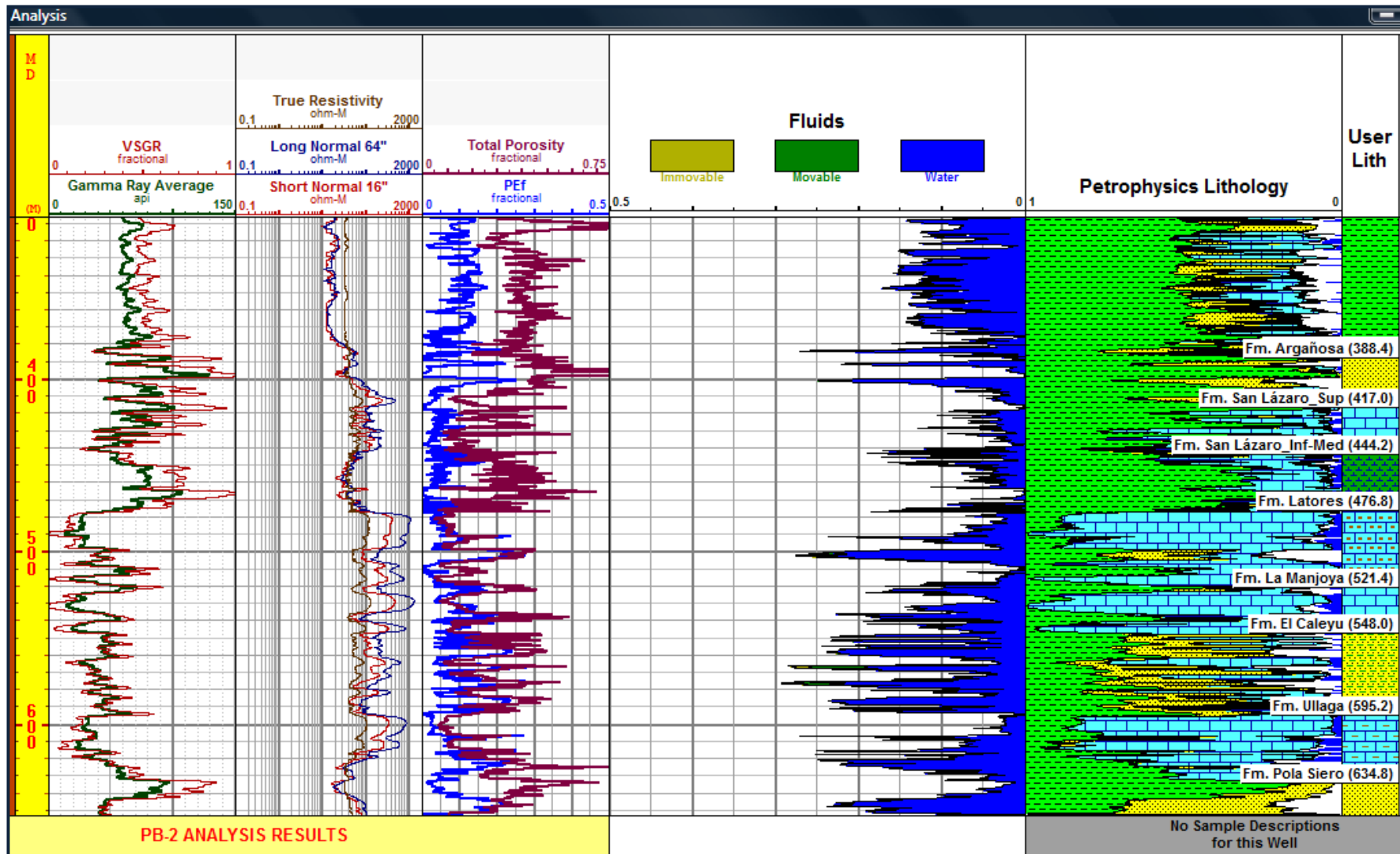


Figura 25. Panel de datos petrofísicos del pozo PB-2.

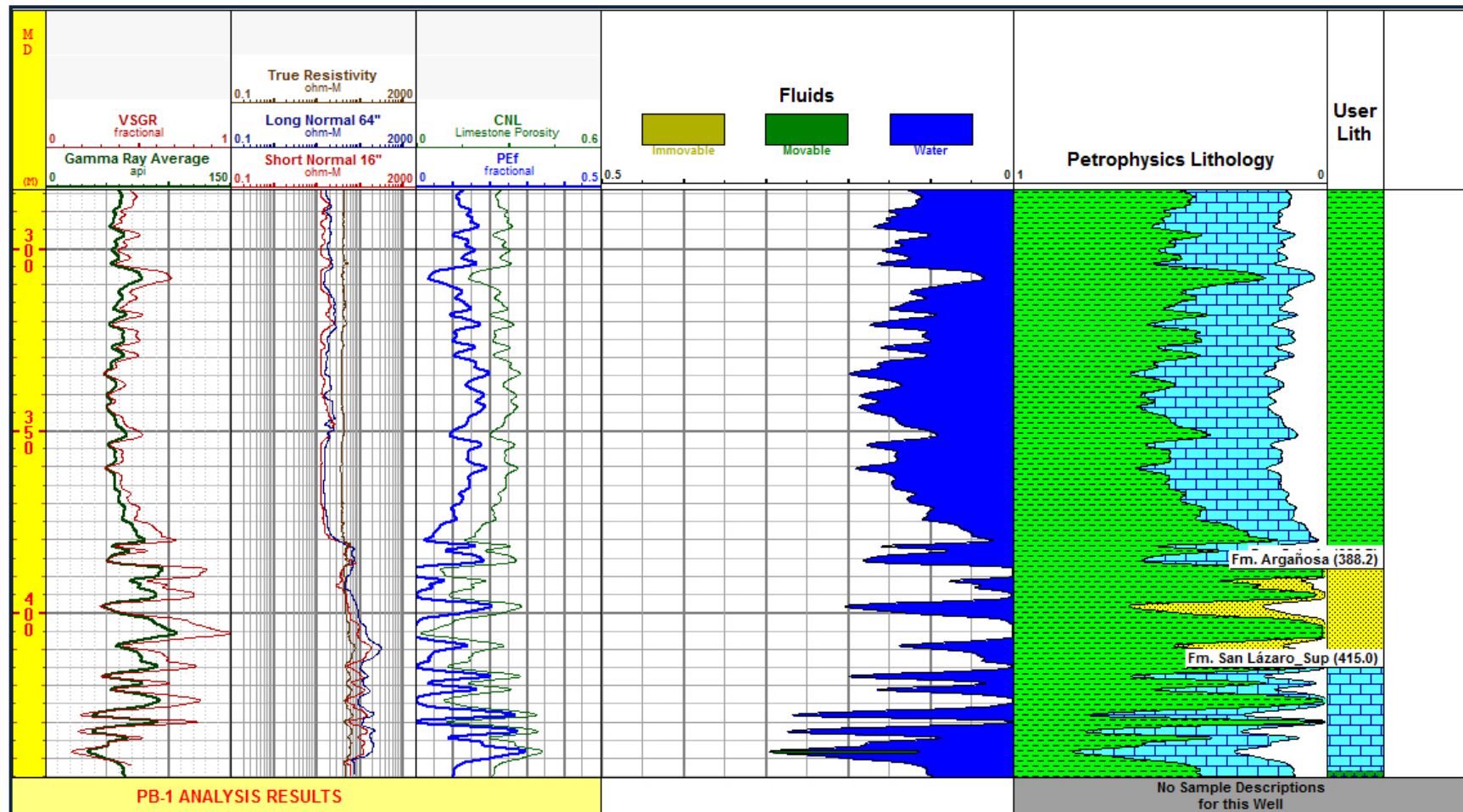


Figura 26. Panel de datos petrofísicos del pozo PB-1.

- Permeabilidad (K).

Los valores de permeabilidad fueron obtenidos mediante la opción de **Estadística de Registros** (ver figura 27), donde se fueron seleccionando el techo y muro de cada formación para obtener el promedio de permeabilidad.

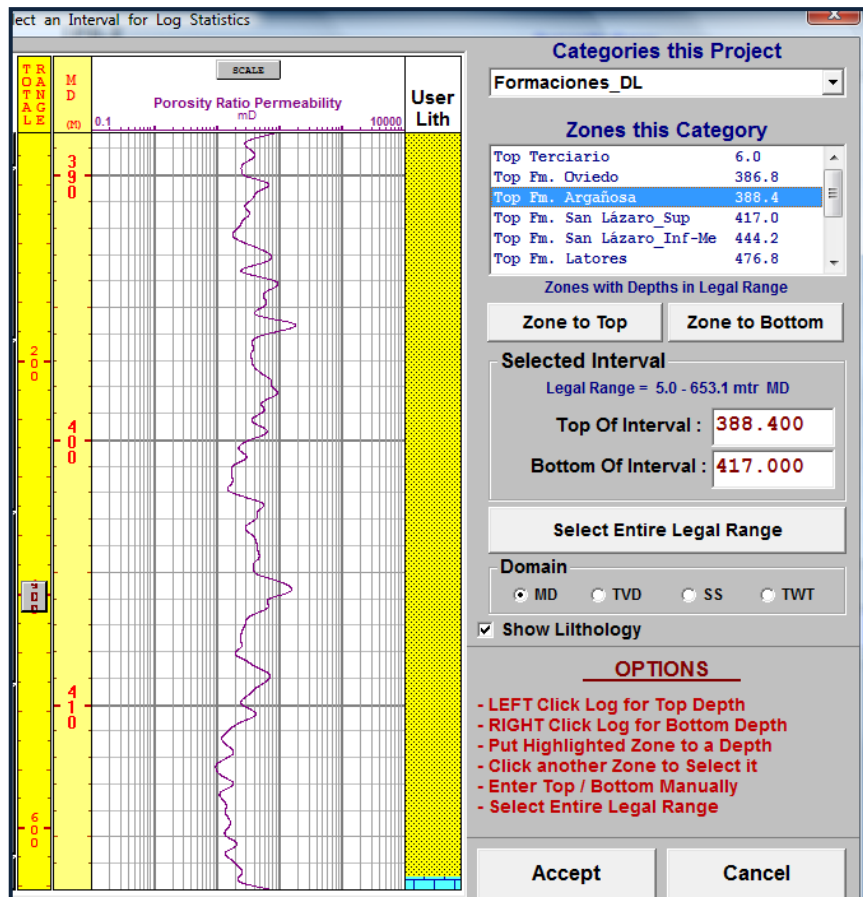


Figura 27. Promedios de Permeabilidades por Formación.

En las figuras 28 y 29, se muestran las curvas de permeabilidad obtenida a partir de la porosidad efectiva. En el pozo PB-2 los valores más altos se ubican en los tramos con más lentes de areniscas (La Argañosa, Latores, El Caleyú y Ullaga), la formación La Manjora tiene también permeabilidades de 35 md, aún cuando no presenta tramos areniscosos, pero es la zona más limpia, es decir con menos contenido de arcilla.

Se observa que el pozo PZ-1 presenta deflexiones continuas en las lecturas del gamma ray, porosidad y permeabilidad, a nivel de las formaciones La Argañosa y Miembro Superior de la Formación San Lázaro, lo que indica que es una zona con muchas arcillas lenticulares de pocos espesores.

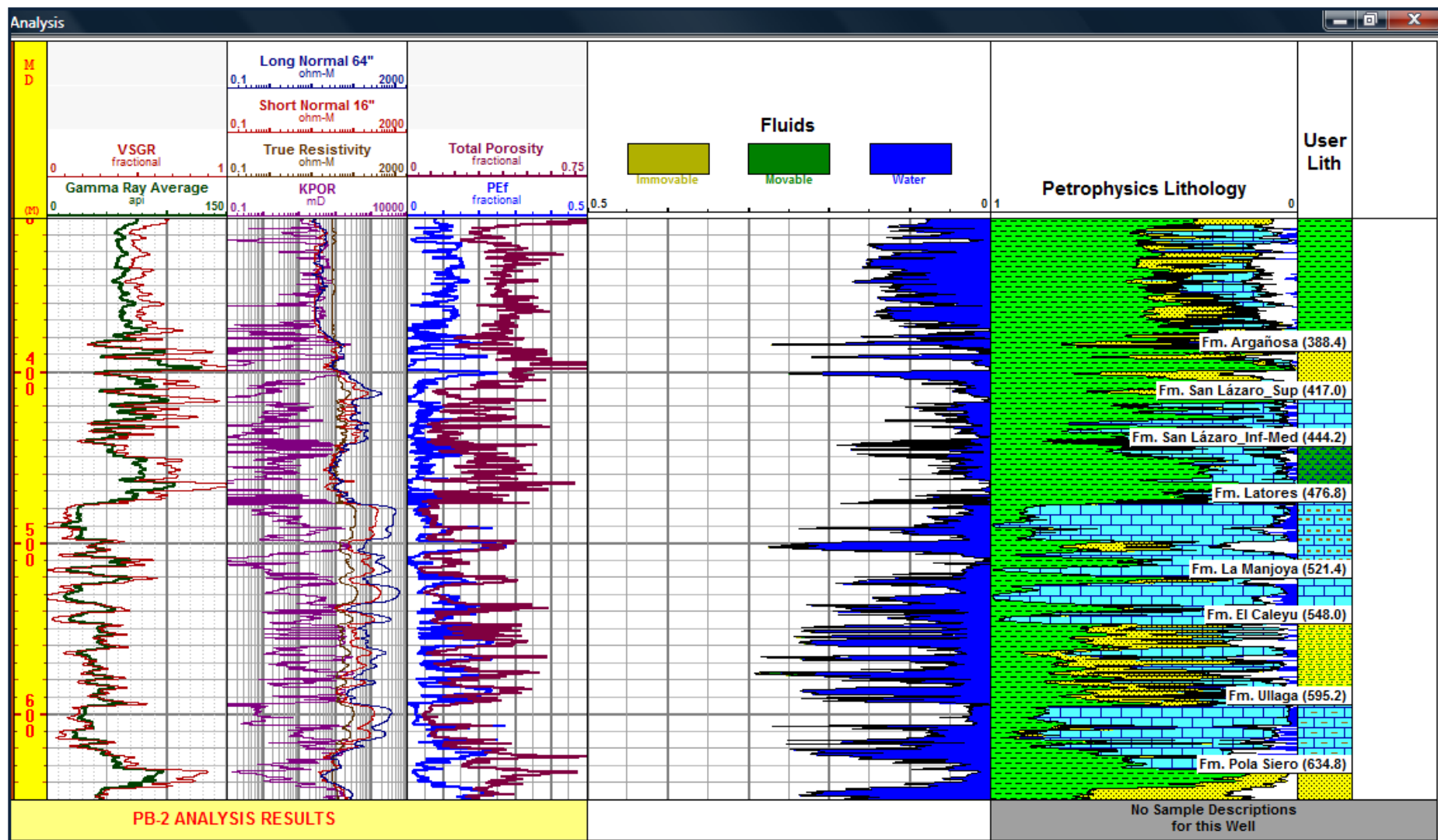


Figura 28. Panel de porosidad efectiva y permeabilidad del pozo PB-2.

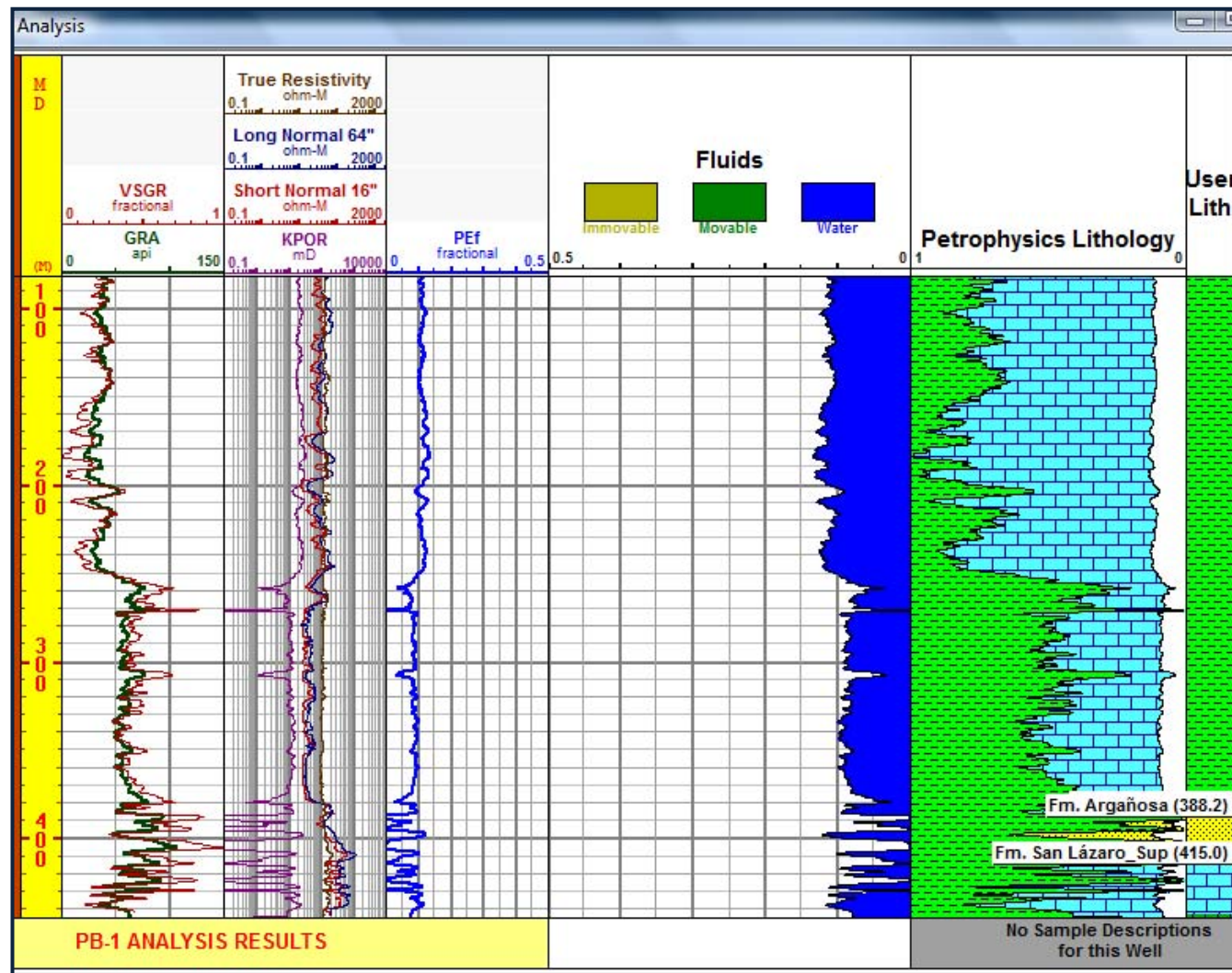


Figura 29. Panel de porosidad efectiva y permeabilidad del pozo PB-1.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos para cada formación expresada en unidades de milidarcys (md) y metros/día, la conversión se realizó mediante la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ darcy} \longrightarrow 0,831 \text{ m/d}$$

$$1 \text{ md} \longrightarrow 0,001 \text{ darcy.}$$

Destacan los valores más bajos en la Formación San Lázaro, esto es debido a que presenta el mayor contenido de arcilla. Las zonas arcillosas aunque presenten altas porosidades, tienen poros tan pequeños que el agua circula muy lentamente a través de ellos, por tal razón presentan tan baja permeabilidad, en particular los miembros Inferior y Medio de la Formación San Lázaro que actúan como acuicludo.

La Formación El Caleyú presenta los valores de permeabilidades más altos, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el medidor de flujo (flowmeter), donde se muestra que esta zona presentó la mayor aportación de agua, un 30 %.

		PB-2		PB-1	
		K(md)	K(m/día)	K(md)	K(m/día)
Acuífero Superior	Fm. La Argañosa	26	0,02	5	0,004
	Fm. San Lázaro Sup.	8	0,01	7	0,01
Acuicludo	Fm. San Lázaro Inf. y Med.	7	0,01		
Acuífero Inferior	Fm. Latores	33	0,03		
	Fm. La Manjota.	35	0,03		
	Fm. El Caleyú.	81	0,07		
	Fm. Ullaga.	33	0,03		
	Fm. Pola de Siero.	20	0,02		

Tabla 5. Datos de permeabilidad.

7. Correlación de Sondeos

En este apartado se muestra la correlación estratigráfica entre los pozos PB-2, PZ-2, PB-1 y AC-530.

La correlación estratigráfica consiste en comparar dos o más secciones estratigráficas, de una edad semejante, para establecer la equivalencia entre las unidades estratigráficas reconocibles en cada una de ellas. Permite deducir la geometría de las unidades, observar, si existen, acuñaientos laterales, cambios de espesor y, en general, conocer su extensión y sus variaciones laterales. Las diagrafas permiten realizar una buena correlación entre secciones estratigráficas de sondeos relativamente cercanos. Se trata de una litocorrelación pues los datos obtenidos mediante las diagrafas (electrofacies) reflejan esencialmente la litología de los materiales atravesados en los sondeos (Vera, 1994)

El primer paso para la correlación fue colocar en secuencia todos los registros incluyendo las curvas de Gamma Ray y Resistividad Normal y posteriormente se identificaron las zonas con facies y características comunes.

En la figura 30 se muestra la situación de las secciones estratigráficas elegidas para elaborar la correlación (figura 31) en la que lo más destacable es la presencia de la Formación Oviedo en el pozo AC-530 mientras que en los pozos PZ-1, PZ-2 y PB-2 está totalmente erosionada. Para el resto de formaciones se observa que las curvas muestran una buena correlación con un comportamiento muy similar en todos los sondeos.

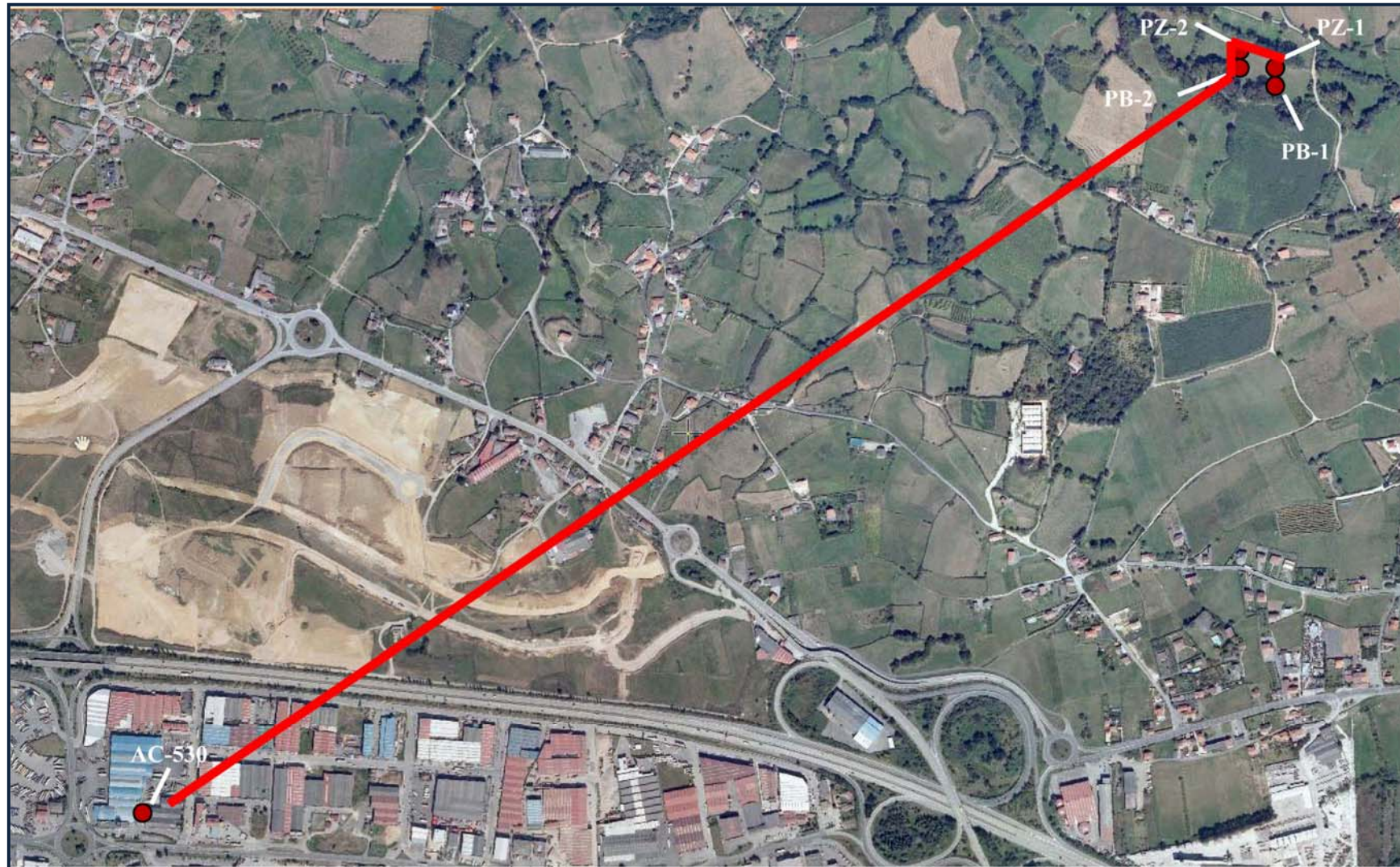


Figura 30. Secciones estratigráficas de correlación (distancia entre PB-2 y AC-530 = 2.257 km)

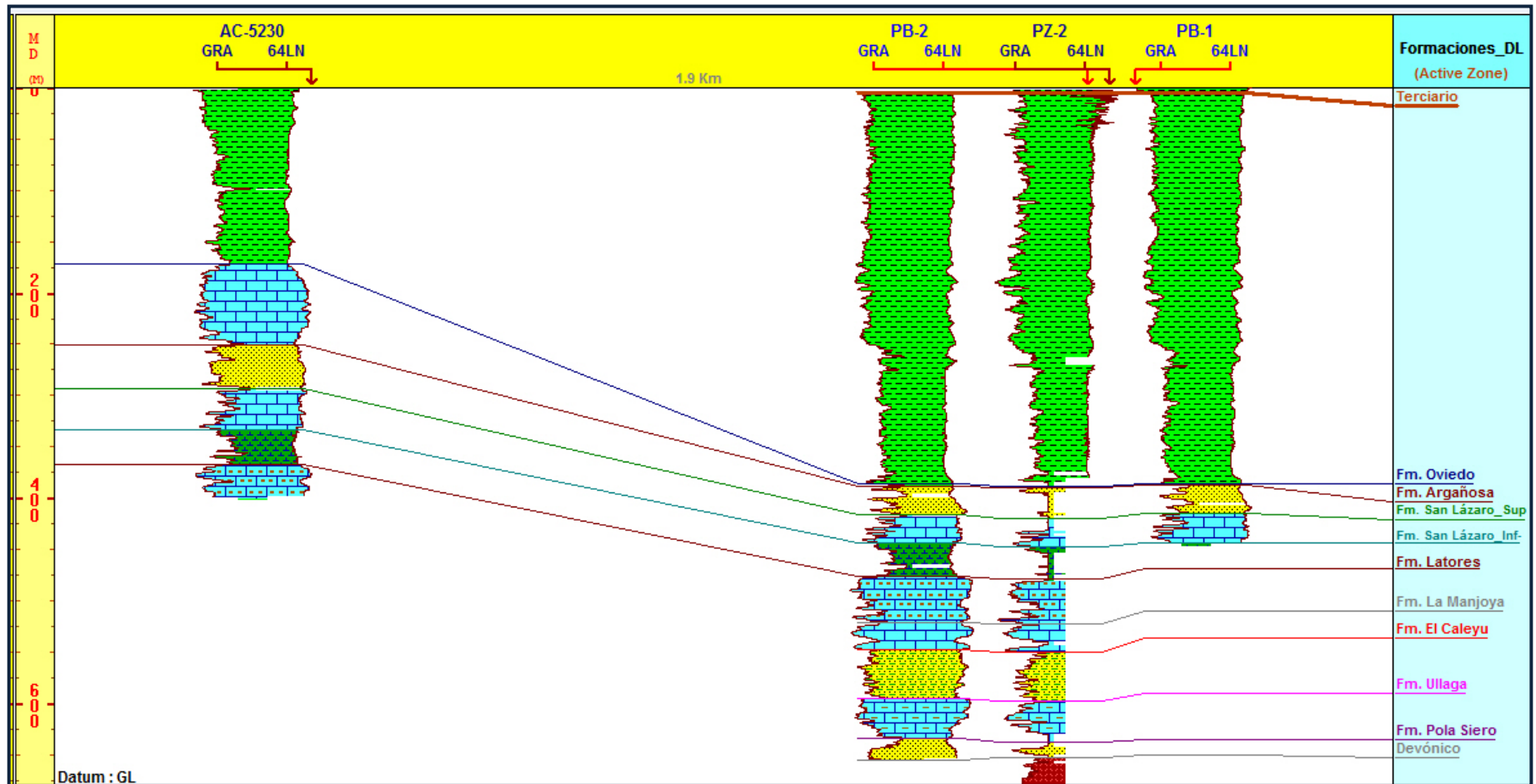


Figura 31. Correlación estratigráfica de Pozos.

8. Conclusiones

- ✓ La interpretación de los registros realizados en los sondeos que atraviesan el Paleógeno y el Mesozoico de la zona de Argüelles – Granda (concejo de Siero) muestra que existe una buena correlación entre las curvas obtenidas, especialmente la de gamma natural, con la columna estratigráfica elaborada a partir de los testigos de sondeo.

- ✓ Desde el punto de vista hidrogeológico se confirma la presencia de dos acuíferos separados por un tramo de baja permeabilidad. Esto se observa de manera especialmente clara en los registros resistivos en los que las curvas experimentan deflexiones muy nítidas frente a los tramos acuíferos. Asimismo, el resto de los registros presenta un comportamiento que permite corroborar los resultados de las diagrfias eléctricas. El neutrón refleja el aumento de porosidad total frente a los miembros inferior y medio de la Formación San Lázaro que es el acuícludo; ante este mismo tramo, y frente a algunos niveles calcáreos karstificados, el registro densidad muestra el descenso de este parámetro y en cuanto al sónico, se observa cómo el tiempo de tránsito aumenta claramente al atravesar estos materiales de elevada porosidad total.

- ✓ De los dos acuíferos identificados, el que presenta mejores propiedades para su aprovechamiento es el acuífero inferior, por tener menor contenido de arcilla, mayores porosidades efectivas que se sitúan en el rango del 10 - 19 %, y permeabilidades que van de 20 a 81md (0,02 – 0,07 m/día). Además es el que presentó la mayor aportación de agua en el registro de medición de flujo (flowmeter).

- ✓ Las curvas obtenidas en los sondeos estudiados presentan un comportamiento muy similar frente a las diferentes formaciones lo que ha permitido elaborar una buena correlación estratigráfica.

9. Referencias Bibliográficas

- Vera Torres, J.A., 1994. Estratigrafía. Principios y Métodos. Editorial Rueda, S.L.
- Llamas, M.R. (2004). “La Gestión Social del Agua”, en J.M. Santafé y C. Bru (edits): Jornadas Internacionales. El Agua: Nuevas Fronteras. Nuevas Visiones.
- Pulgar, J., Alonso, J. L., (1999). Trabajos Geología, Universidad de Oviedo, 21, 283-294.
- Caparrini, N. 2006. Interpretación y Correlación de Registros Geofísicos en Sondeos de Captación de Aguas Subterráneas para la Caracterización hidrogeológica y la Gestión de la Explotación.
- Cruz, E., 1991. SEEROIL International. “Interpretación de Registros de pozos a Hueco abierto” 20-40.
- Hung, Enrique. 1994. *Petrofísica para Geólogos e Ingenieros de Producción*. 5,50.
- Estudio Geológico, Geofísico e Hidrogeológico de la Cuenca de Oviedo-Llanera Siero. Universidad de Oviedo. Empresa AcuAnorte.
- AcuaNorte. 2008. Ejecución de Sondeos de Investigación de Aguas Subterráneas en los Acuíferos de la Cuenca Oviedo-Llanera-Siero para la actuación de “Mejora del Abastecimiento de Agua en la Zona Central de Asturias”
- Schlumberger. *Evaluación de formaciones* (en línea). 03 de Junio de 2013. Disponible en la Web:
<http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms.aspx?LookIn=termsname&filter=shale&p=1>
- Schlumberger. 1987: Log Interpretation Principles/Applications.
- Guarochico, J., Díaz, C. 2009. Identificación Litológica del pozo Centenera 1 mediante 1 “Cross-Plot” Sónico Neutrón. Pulgar, J., Alonso, J. L., (1999).
- Schlumberger (1975). Interpretación de perfiles. Volumen I. Fundamentos.

10. Anexos

ANEXO 1: ECUACIONES DEL SOFTWARE

ECUACIONES POROSIDAD

Las siguientes ecuaciones porosidad se utilizan en el programa de análisis de registro, las mismas fueron descargadas de la herramienta.

- Porosidad por registro Sónico (Método de Wylie)

- 1: $CP = \max(1, CDTSH / UserCP)$
- 2: $PHIS = (DELTA - DELTMA) / (DELTW - DELTMA) / CP$
- 3: $PHISSH = (DELTS - DELTMA) / (DELTW - DELTMA) / CP$
- 4: $PHISC = SISP - Vsh * PHISSH$

donde:

- CDTSH = En la arcilla tiempo de viaje para la corrección de compactación
- CP = factor de compactación (fraccionada)
- USERCP = Factor de corrección de compactación
- DELTA = sonic lectura de registro en la zona de interés (us / ft)
- DELTMA = lectura en registro sónico 100% matriz rocosa (us / ft)
- DELTS = lectura en registro sónico 100% de esquisto (us / ft)
- DELTW = sonic lectura conectarse fluido de formación
- PHIS = porosidad aparente del registro sónico (fraccionada)
- PHISC = porosidad del registro sónico por el método de Wylie (fraccionada)
- PHISSH = porosidad aparente del registro sónico del 100% arcilla (fraccionada)
- Vsh = volumen de arcilla (fraccionada)

- Porosidad de los registros de neutrones de estilo antiguo.

Registros GR-N-estilo antiguo (o algún registro de neutrones sin escala registrada en unidades de cuentas por segundo o API) deben ser convertidos a unidades de porosidad. A escala logarítmica se aplica a las siguientes fórmulas utilizando el método de alta porosidad / baja porosidad:

- 1: $\text{pendiente} = (\log(PHIHI / FILO)) / (CPSHI - CPSLO)$
- 2: $INTCPT \cdot PHIHI / 10 = 10^{(CPSHI * PENDIENTE)}$
- 3: $PHIN = INTCPT * 10^{(PENDIENTE * PNC)}$

donde:

- CPSHI = GRN cuenta con un alto punto de porosidad
- CPSLO = GRN cuenta en el punto de baja porosidad

PCN = lectura de registro de neutrones en cuentas por segundo
 PHIHI = alto punto de porosidad (fraccionada)
 FILO = bajo punto de porosidad (fraccionada)
 Phin = neutrones aparente registro de porosidad (sin corregir la pizarra)

- **Matriz de desplazamiento para los registros de neutrones**

El programa de análisis de registros sólo funciona en los datos de neutrones que se escala en unidades de piedra caliza, y convierte automáticamente los datos que se escala en unidades de arenisca:

Caso 1: Arenisca unidades de porosidad a las unidades de piedra caliza.

$$PHIN_m = PHIN-3-1 * (IF LOG "CNL")$$

Caso 2: Mud corrección del grosor de la torta (sólo SNP).

$$PHIN_m = PHIN-0.01 * \max(0, CAL-BITZ)$$

donde:

BITZ = tamaño en bits (pulgadas)

CAL = espesor (mm)

PHIN original de lectura = log neutrones

PHIN_m = porosidad neutrón corregido litología (fraccionada)

- **La porosidad por registro de densidad.**

$$1: Phid = (DENS-DENSMA) / (DENSW-DENSMA)$$

$$2: PHIDSH = (DENSH-DENSMA) / (DENSW-DENSMA)$$

$$3: PHIdc = Phid-Vsh * PHIDSH$$

donde:

DENS = lectura registro de densidad (g / cc)

DENSMA = lectura registro de densidad en el 100% matriz rocosa (g / cc)

DENSSH = lectura registro de densidad en el 100% de esquisto (g / cc)

DENSW = lectura registro de densidad en el fluido de formación (g / cc)

Phid = porosidad del registro de densidad corregida (fraccionada)

PHIdc = porosidad corregida para esquisto (fraccionada)

PHIDSH = porosidad aparente de 100% de esquisto (fraccionada)

Vsh = volumen de esquisto (fraccionada)

ECUACIONES RW

Resistividad del agua de formación

$$1: R_{wa} = (P_{hie} \wedge M) * RESD / A$$

donde:

Un exponente tortuosidad = (sin unidades)

M = exponente de cementación (sin unidades)

P_{hie} = porosidad efectiva a partir del análisis del registro (fraccionada)

RESD = lectura más profunda registro de resistividad

R_{wa} = resistividad del agua a temperatura formación

CORRECCIONES

- Gamma Ray Corregido por efecto de pozo

$$1: \text{ENTONCES } GR_c = GR * (1 + 0.04 * (MWT - 8.3)) * (1 + 0.06 * (CAL - 8))$$

$$2: \text{EN CASO DE } CAL = 0 \text{ THEN } CAL = \text{TAMAÑO AGUJERO}$$

$$3: \text{SI } MWI = 0 \text{ THEN } GR_c = GR$$

donde:

CAL = pinza registro de lectura del tamaño del agujero (mm)

GR = gamma ray registro de lectura (unidades del API)

GR_c = rayos gamma corregida para el tamaño del pozo y el barro peso (unidades de API)

MWI = densidad del lodo (lb / gal)

- Inducción profunda (ILD) Corregido por efecto de pozo

$$1. CAL \leq 12 \text{ entonces } g = 0,0001 * CAL - 0,0011 \text{ MÁS } G = 0,00073 * CAL - 0,0092$$

SATURACIÓN DE AGUA

- La saturación de agua a partir del método Archie

1: SI $Phie \leq 0.0$ O SI $Vsh > 1.0$ ENTONCES $Swa = 1.0$

2: OTRA $Swa = (A * RW @ FT / (Phie ^ M) / RESD) ^ (1 / N)$

donde:

Un exponente tortuosidad = (sin unidades)

M = exponente de cementación (sin unidades)

N = exponente de saturación (sin unidades)

Phie = porosidad efectiva (fraccionada)

RESD = resistividad de zona (ohm-m)

RW @ FT = resistividad del agua a la temperatura de formación (ohm-m)

Swa = saturación de agua de Archie método (fraccionada)

Parámetros recomendados:

Areniscas: A = 0,62

M = 2,15

N = 2,00

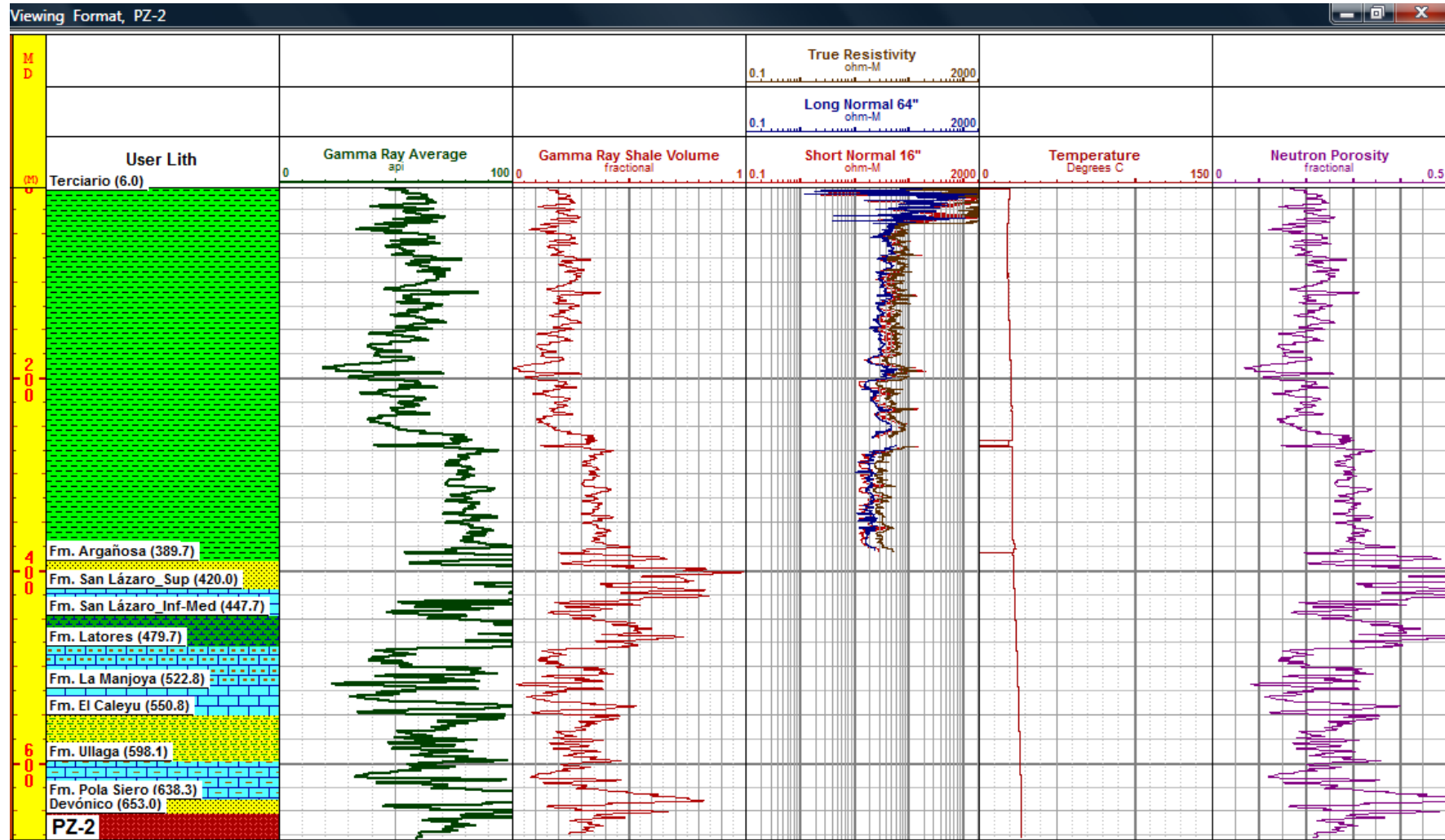
Carbonatos: A = 1,00

M = 2,00

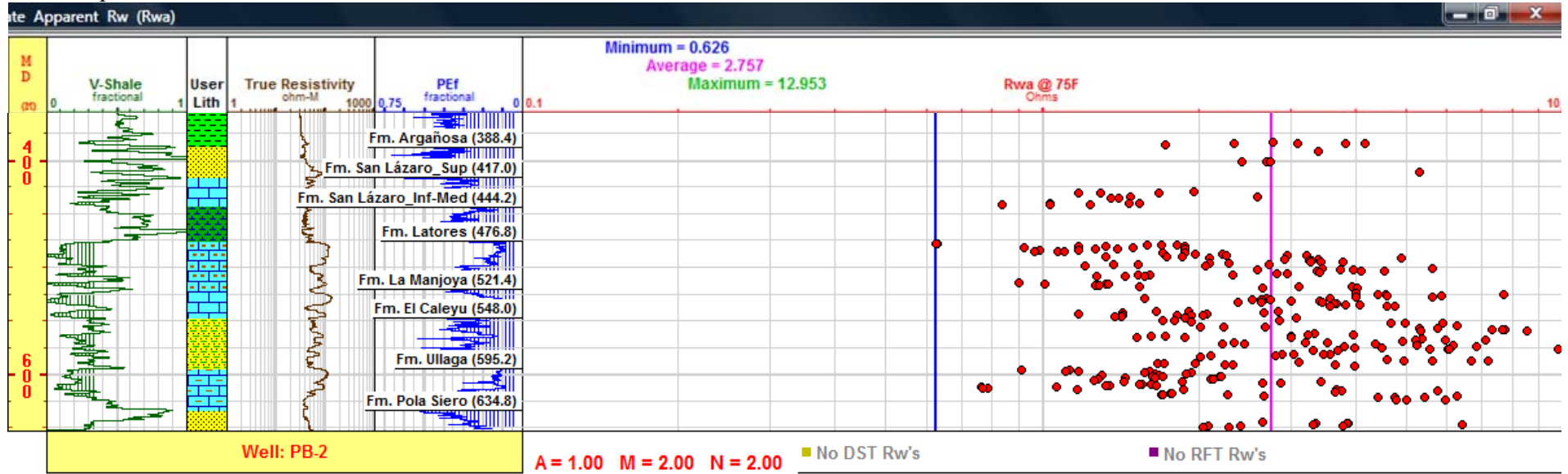
N = 2,00

ANEXO II: DIAGRAFIAS

Registros Pozo-PZ-2



Rwa del pozo PB-2



ANEXO III: FOTOS EJECUCIÓN DEL SONDEO



Sonda Caliper utilizada para registrar el diámetro de perforación.



Trabajos para entubación del pozo.



Ejecución del sondeo PZ-2 con extracción de testigo continuo.