

Elaboración del Perfil Tipo a partir de la integración Roca – Perfil y la metodología de Estratigrafía Secuencial en los reservorios complejos de las unidades sistema Tarma- Copacabana en la Cuenca Madre de Dios

Preparation of the Log type of rock - log integration and Sequential Stratigraphy methodology in the complex reservoirs of the units, Tarma-Copacabana system in Madre de Dios Basin

Edson J. Castillo Guzmán ¹

Recibido: Enero 2019 - Aprobado: Junio 2019

RESUMEN

Las rocas carbonáticas en el Perú han sido poco estudiadas, debido a su variabilidad mineralógica, a sus procesos de sedimentación poco entendidos y a la complejidad de sus atributos de roca (porosidad, permeabilidad).

El objetivo de la presente investigación es obtener el perfil tipo integrado que sirva de patrón de correlación para la interpretación de las secciones geológicas y mapas, con el fin de elaborar un modelo predictivo, con la distribución areal de potenciales reservorios dentro de los Grupos Tarma y Copacabana compuestos principalmente de facies carbonáticas y en menor proporción silicoclásticas y evaporíticas en conjunto tienen espesores que van desde los 800 m a 1000 m. El modelo deposicional – genético ha identificado 4 secuencias en tercer orden, que encadenan ambientes desde continentales hasta marinos distales. Se aprecia que dentro de cada secuencia se han relacionado hasta tres cortejos sedimentarios: sistema de mar bajo (continental), sistema transgresivo y sistema de mar alto (plataforma interna – externa y marino), que definen los atributos de roca identificándose los niveles con porosidad dentro de los sistemas de mar bajo (LST) y alto (HST).

Palabras clave: Modelo deposicional; atributos de roca; sistemas encadenados.

ABSTRACT

Carbonaceous rocks in Peru have been little studied because of the mineralogical variability, their poorly understood sedimentation processes and the complexity of their rock attributes (porosity, permeability).

The objective of the present research is to obtain an integrated log type that serves as a standard for the elaboration of geological sections and maps, in order to establish a predictive model, in an areal distribution of potential reservoirs within calcareous units. Tarma and Copacabana groups mainly composed of carbonaceous facies, with a lower proportion of silicoclastics and evaporites, all have thicknesses ranging from 800 to 1000 meters. Within the depositional model, 4 sequences have been identified in the third order, from Continental Environments to Distal marine. It is seen that within each sequence of third order have been related up to three sedimentary courts; (Continental), transgressive and high seas (platform), which integrates them with the attributes of rock, it is identified that the levels of porosity are found in the LST and HST systems.

Keywords: Deposition model; rock attributes; chained systems.

¹ Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: edjer17@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios de la porosidad en rocas complejas del Pérmico son escasos y representan un gran reto para los geólogos e ingenieros, especialmente en la definición de nuevas técnicas de predictibilidad y continuidad de la porosidad en rocas carbonatadas, debido al poco entendimiento de los diferentes procesos de generación de porosidad

El alcance del presente estudio es la preparación del perfil integrado que permita relacionar las características sedimentológicas – petrofísicas de las rocas, con el fin de identificar niveles potenciales de reservorios con atributos petrofísicos de roca óptimos, reconocidos y ubicados dentro de modelo deposicional de plataformas o rampas carbonáticas del Carbonífero - Pérmico.

El análisis de Estratigrafía de Secuencias ha permitido mejorar el entendimiento de los procesos sedimentarios, identificar superficies, definir los sistemas encadenados y secuencias deposicionales, como dato de entrada para la interpretación petrofísica de los perfiles de pozo logrando la integración roca - perfil.

1.1 Ubicación

La Cuenca de Madre de Dios está ubicada al sureste del Perú, norte de Bolivia y el suroeste de Brasil, el cual tiene un área de 77.500 km² en el sector peruano.

Morfo estructuralmente el área de estudio se encuentra en el Antepaís de la Cuenca Madre de Dios, está limitado al este por el Cratón Brasileño, al sur por el Arco de Madidi y

al noroeste por el Arco de Manu, Figura N° 1.

En la cuenca Antepaís, se han perforado 4 pozos exploratorios (Pariamanu-1X, Puerto Primo-2X, Río Cariyacu-1X y los Amigos-2X). Figura N°2, estos atravesaron las unidades desde el Cenozoico hasta el Paleozoico. Figura N°3 muestra dos secciones de geología de campo (Alto Manu y Pongo de Coñec) que se han utilizados para la confección del perfil tipo integrado.

1.2 Geología Regional

La Cuenca Madre de Dios tiene dos ambientes tectónicos: La faja Plegada y corrida al suroeste y el Antepaís al noreste, las unidades litoestratigráficas en la cuenca abarca edades desde el Ordovícico al Cenozoico, variando en espesores desde 1000 metros al noreste hasta 6000 metros en las zonas del depocentro. Perupetro, (2002).

El Grupo Cabanillas de edad Devónica muestra varias facies incluyendo pizarras negras. El Grupo Ambo de edad Carbonífero Inferior. Tiene facies sedimentarias de areniscas, lutitas negras y calizas, de ambiente mareal. El Grupo Tarma de edad Carbonífero Inferior sobryace en discordancia al Grupo Ambo y está constituido por areniscas de origen continental en la base denominada Green Sandstone que cambian a facies de plataforma como lutitas y calizas. Sobryaciendo al Grupo Tarma se encuentra el Grupo Copacabana, compuesto de calizas intercaladas con limolitas rojizas y lutitas negras sobryace la Formación Ene de edad Pérmico Superior, constituida por rocas de origen continental y lacustre. Sobryaciendo

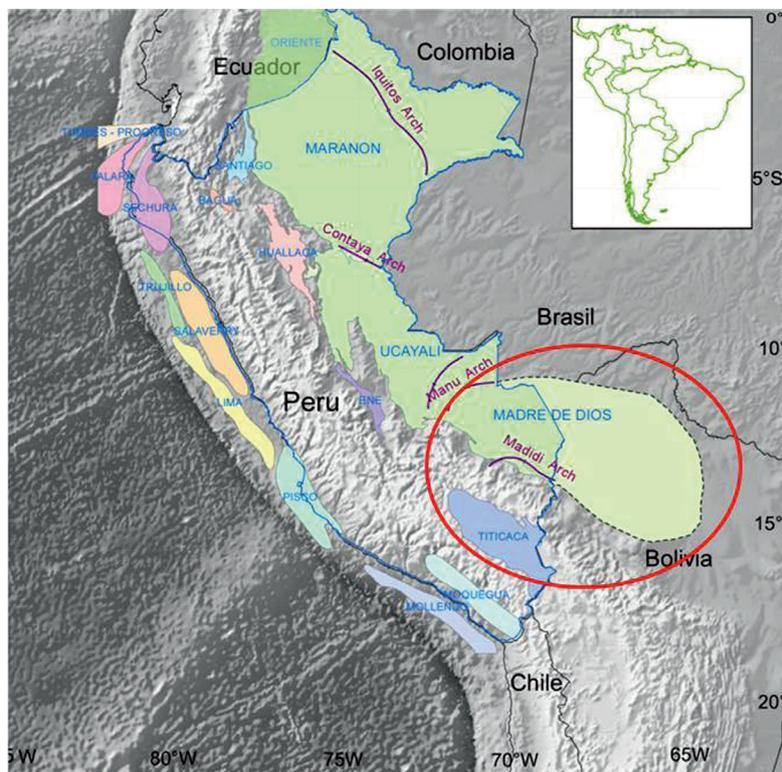


Figura N°1. Se observa distribución areal de la cuenca Madre de Dios y los límites al norte, este y oeste.

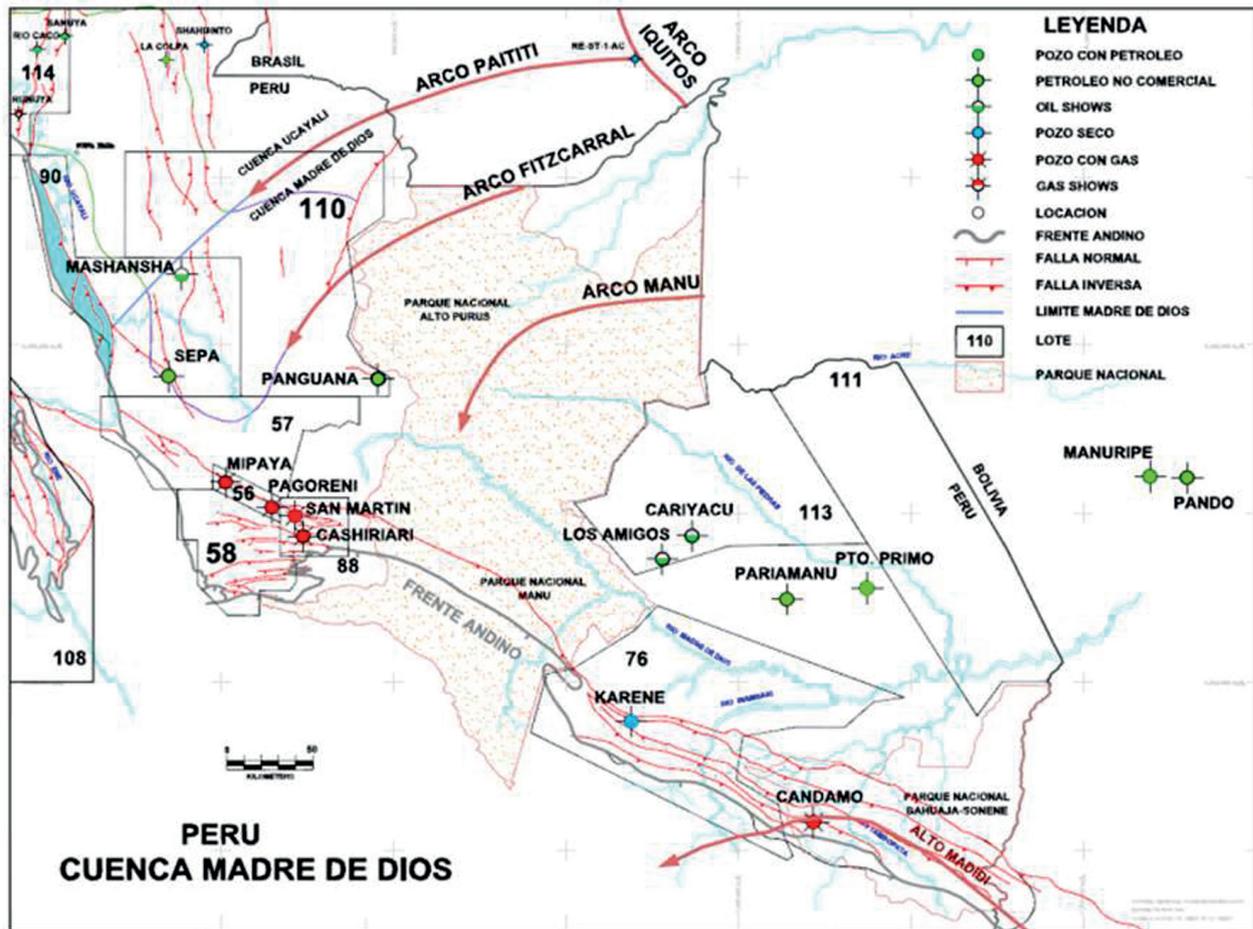


Figura N°2. Área de estudio y ubicación de pozos: Los Amigos, Cariyacu, Pariamanu, Puerto Primo, al oeste se ubican los pozos del área de Camisea (Flores Guerra, 2013)

se encuentra el Grupo Mainique que principalmente está constituida por areniscas de facies eólicas.

Por encima del Grupo Mainique están las unidades silicoclásticas de Chonta y Vivian, cubre toda la cuenca la sección Cenozoica con las unidades Huayabamba e Ipururo de ambientes fluviales meandriformes que están constituidas por canales y llanuras de desborde (lutitas y limolitas) se distribuye ampliamente en el oriente peruano y en la cuenca del Madre de Dios. Perupetro, (2002). (Figura N°3)

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración del perfil tipo integrado se usó la data publicada y de libre disponibilidad de empresas, universidades. Los datos de registros eléctricos de pozos, análisis de roca (núcleos y afloramientos) han sido proporcionados principalmente por entidades como PERUPETRO S.A. e INGEMMET.

La metodología consiste en la evaluación petrofísica para obtener los atributos de roca en función de las ecuaciones empíricas determinadas, así mismo aplicación de la Estratigrafía Secuencial que desarrolla la evolución

genética – deposicional definiendo las superficies y los sistemas encadenados en cada pozo y correlacionados a nivel de cuenca.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Descripción estratigráfica de las unidades en estudio

3.1.1 Unidad Tarma (Pensilvánico): Tiene un espesor promedio de 200 m y se han definido dos Secuencias estratigráficas de tercer orden:

Secuencia 1: Está constituida por 3 sistemas encadenados: De mar bajo compuesto de facies silicoclásticas fluvio - estuarinas de color gris verdoso y buena porosidad visual conocida como “Green Sandstone”, delimitado en la base por la discordancia subaerea (DS) y en el tope la superficie de máxima regresión (SMR) que marca el inicio del sistema transgresivo (TST) de facies evaporíticas de color blanco, sucrosicas y plásticas; y dar inicio a la plataforma somera con niveles de calizas tipo mudstone y packstone Terra, G. (2010) y Dunhan, R. (1962), continua la generación de carbonatos durante

los estadios de alcanzar y mantener, Schlager, W. (2002), marca un pequeño evento de HST; hasta el ahogamiento de la fábrica, llegando a la máxima superficie de inundación (SIM), para dando inicio al sistema encadenado de mar alto (HST) representado por los eventos carbonáticos en facies progradante que exponen la plataforma y canibalizada por la siguiente Secuencia. Figura N°4.

Secuencia 2: Constituida por 2 sistemas encadenados, Transgresivo (TST) y de mar alto (HST). A diferencia de la

secuencia 1 la secuencia 2 inicia con el sistema transgresivo temprano (TST Early) con facies evaporíticas y el inicio de la generación de la fábrica carbonática somera, luego la transgresión neta se caracteriza por la generación de carbonatos durante los fenómenos de alcanzar y mantener, Schlager, W. (2002), pequeño evento de HST; hasta ahogar el sistema que es limitado por la superficie de máxima inundación (SIM), continua el sistema encadenado de mar alto (HST) representado por calizas progradantes, finaliza con la exposición y erosión por la siguiente secuencia. Figura N°5.

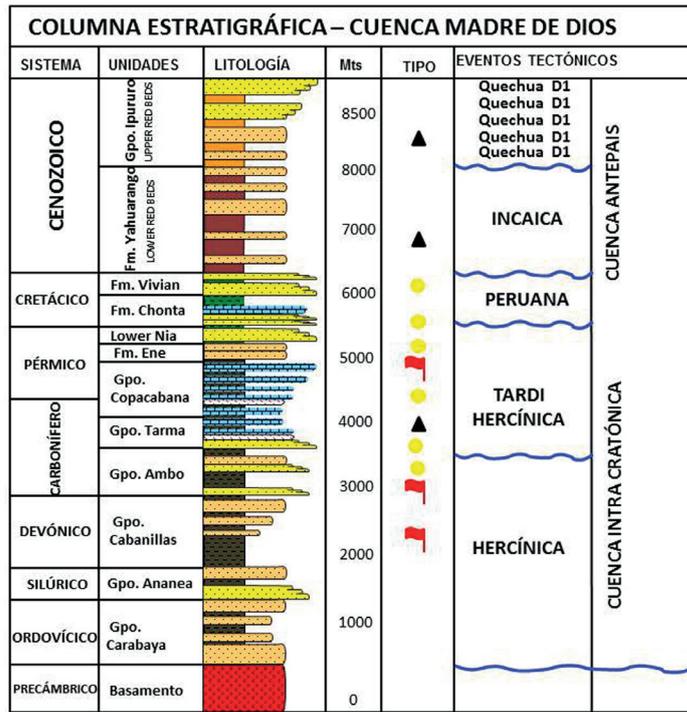


Figura N°3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Madre de Dios (Modificado de Perupetro 2002 en Castillo 2017 en revisión).

**Modelo de Plataforma de aguas poco profundas en 3er Orden
Secuencia N.-1**

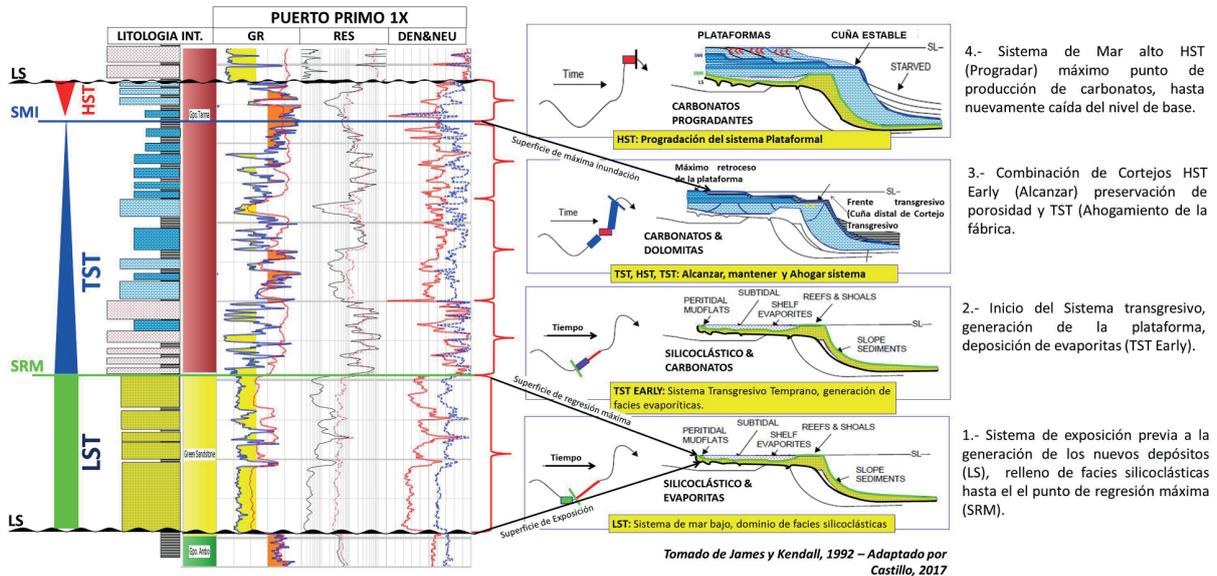


Figura N°4. Secuencia 1 (Unidad Tarma); se observan tres sistemas encadenados: Sistema de Mar bajo, Transgresivo y Mar alto.

3.1.2 Unidad Copacabana (Pérmico Inferior): En la Cuenca Madre de Dios tiene un espesor promedio de 700 m y se ha subdividido en dos Secuencias de tercer orden:

Secuencia 3: Inicia con el sistema transgresivo temprano (TST early), caracterizado por anhidritas, intercalado con calizas y niveles de dolomías, continua la transgresión neta con los estadios de alcanzar y mantener (pequeño evento de HST); terminando en el ahogamiento del sistema llegando al SIM, identificado por lutitas grises oscuras, finalmente inicia el sistema encadenado de mar alto caracterizado por rocas carbonáticas progradantes. Figura N°6.

Secuencia 4: Inicia con el sistema transgresivo temprano (TST early), caracterizado por anhidritas, intercalado con calizas y niveles de dolomías, continua la transgresión neta con los estadios de alcanzar y mantener (pequeño evento de HST); terminando en el ahogamiento del sistema llegando al SIM, identificado por lutitas grises oscuras, finalmente inicia el sistema encadenado de mar alto caracterizado por rocas carbonáticas progradantes. En la Secuencia 4 el sistema de mar alto es más desarrollado donde se reconocen tres niveles de progradación de carbonatos hasta la caída del nivel de base y posterior exposición. Compilado de James y Kendal, (1992); Jones y

**Modelo de Plataforma de aguas poco profundas en 3er Orden
Secuencia N.-2**

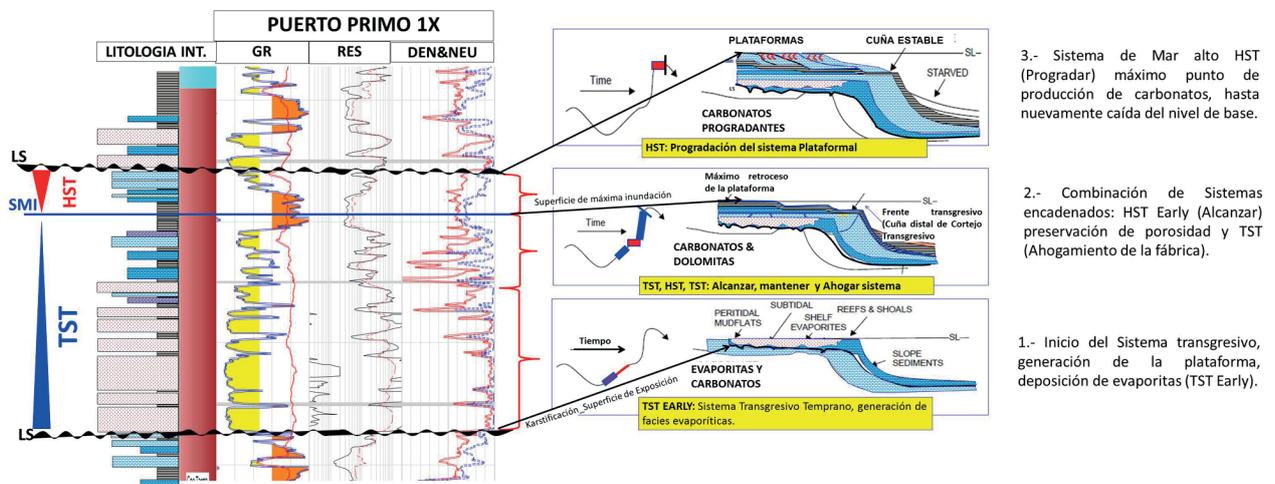


Figura N°5. Secuencia 2 (Unidad Tarma); se definen dos sistemas encadenados: Transgresivo y de Mar alto

**Modelo de Plataforma de aguas poco profundas en 3er Orden
Secuencia N.-3**

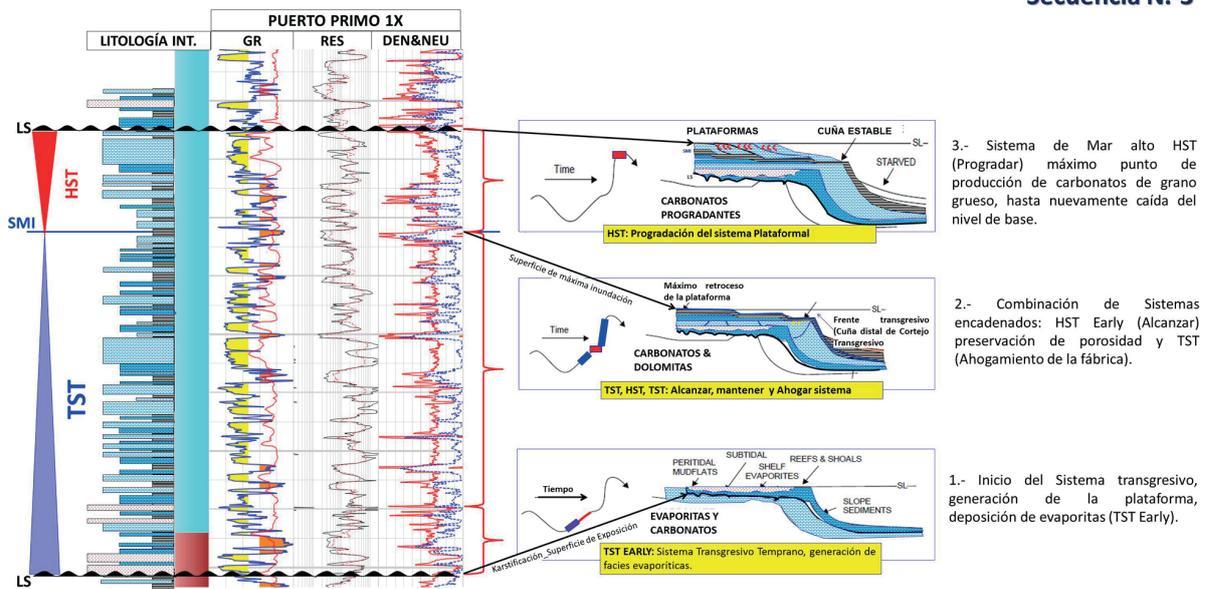


Figura N°6. Secuencia 3 de la Unidad Copacabana; en la cual se definen dos sistemas encadenados (Transgresivo y Mar alto).

Desrochers, (1992) y Schlager, (1992), Figura N°7.

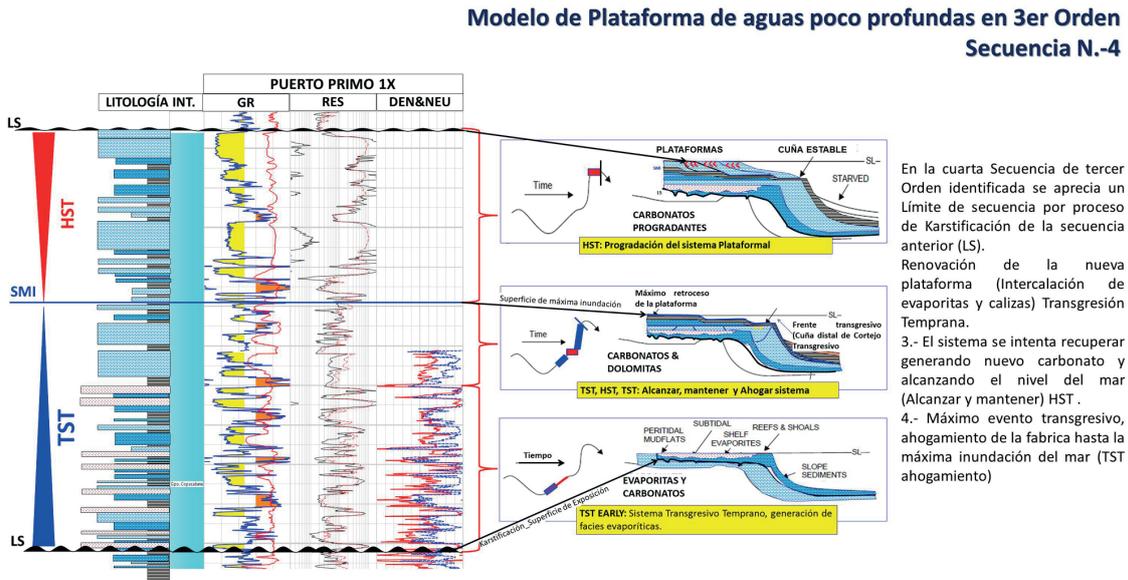
3.2 Integración Perfil Litológico – Perfiles Eléctricos

Con los perfiles eléctricos, GR (Gamma Ray), Resistividades, Densidad – Neutrón y Factor Fotoeléctrico, las litologías descritas en los perfiles y las columnas estratigráficas de campo, se realizó la correlación litoelectrográfica, para elaborar el perfil compuesto integrando. Perfil compuesto se muestra en la figura N° 8, para el caso de las facies silicoclásticas de la base del

Grupo Tarma se correlación con las facies silicoclásticas descritas en la sección de campo del Pongo de Coñec y se integró a los perfiles eléctricos de los pozos, Encontrándose correlación y respuestas coherentes, se continuo identificando y relacionando todas las litologías descritas al perfil eléctrico. Figura N°9.

3.3 Aplicación de la metodología de Estratigrafía de Secuencias – Unidades Tarma – Copacabana – Definición del modelo sedimentario

El perfil electrográfico compuesto, se aplicó para determinar



En la cuarta Secuencia de tercer Orden identificada se aprecia un Límite de secuencia por proceso de Karstificación de la secuencia anterior (LS).
Renovación de la nueva plataforma (Intercalación de evaporitas y calizas) Transgresión Temprana.
3.- El sistema se intenta recuperar generando nuevo carbonato y alcanzando el nivel del mar (Alcanzar y mantener) HST .
4.- Máximo evento transgresivo, ahogamiento de la fabrica hasta la máxima inundación del mar (TST ahogamiento)

Figura N°7. Secuencia 4 (Unidad Copacabana); se define dos sistemas encadenados: Sistema Transgresivo y Sistema de Mar alto.

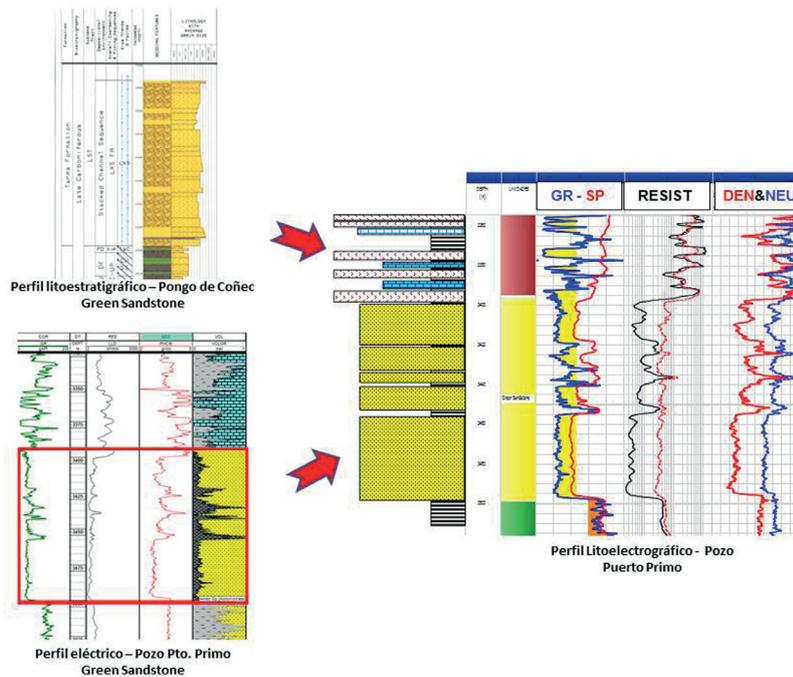


Figura N°8. Generación del perfil compuesto integrando datos de perfiles eléctricos con información de secciones de campo y perfiles litológicos de los pozos.

las litoelectrofacies, los patrones de apilamiento, que asociadas definieron los subambientes y ambientes sedimentarios, así como las superficies estratigráficas claves que determinan los límites de secuencias (LS), Superficie de máxima regresión (SRM) y Superficie de máxima inundación (SIM).

Se han determinado 3 Sistemas encadenados: Sistema de mar bajo (LST) que principalmente está relacionado a ambiente continental - playero, Sistema transgresivo (TST) definido por los Ambientes Evaporíticos –

Plataforma interna – Media, y el Sistema de mar alto (HST), definido por el ambiente de plataforma expuesta – proximal, Figura N°10.

3.4 Integración Estratigrafía de Secuencias – Petrofísica – Posicionamiento de los atributos de roca dentro del modelo deposicional

Para la obtención de los atributos petrofísicos se realizó el análisis multimineral con los perfiles eléctricos básicos (Gama Ray, Densidad, Neutrón y Sónico), aplicando el método de regresión multimineral con el objetivo de

Name	Formula	DLOG (g/cm ³)	ΦSNP (p.u.)	ΦCNL (p.u.)	ΦARS† (p.u.)	τ _e (μsec/ft)	τ _s (μsec/ft)	P _e	U
Silicates									
Quartz	SiO ₂	2.64	-1	-2	-1	56.0	88.0	1.8	4.8
β-Cristobalite	SiO ₂	2.15	-2	-3				1.8	3.9
Opal (3.5% H ₂ O)	SiO ₂ (H ₂ O) ₁₂₀₀	2.13	4	2		58		1.8	3.7
Garnet [‡]	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	4.31	3	7				11	48
Hornblende [‡]	Ca ₂ NaMg ₃ Fe ₂ AlSi ₆ O ₂₂ (OH) ₂	3.20	4	8		43.8	81.5	6.0	19
Tourmaline	NaMg ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₂ (OH) ₄	3.02	16	22				2.1	6.5
Zircon	ZrSiO ₄	4.50	-1	-3				69	311
Carbonates									
Calcite	CaCO ₃	2.71	0	0	0	49.0	88.4	5.1	13.8
Dolomite	CaCO ₃ MgCO ₃	2.85	2	1	1	44.0	72	3.1	9.0
Ankerite	Ca(Mg,Fe)(CO ₃) ₂	2.86	0	1				9.3	27
Siderite	FeCO ₃	3.89	5	12	3	47		15	57

Figura N°9. Tabla de respuestas de las diferentes herramientas de perfilaje en presencia de minerales en las rocas sedimentarias, Schlumberger (2009) – Log Interpretation Chart book

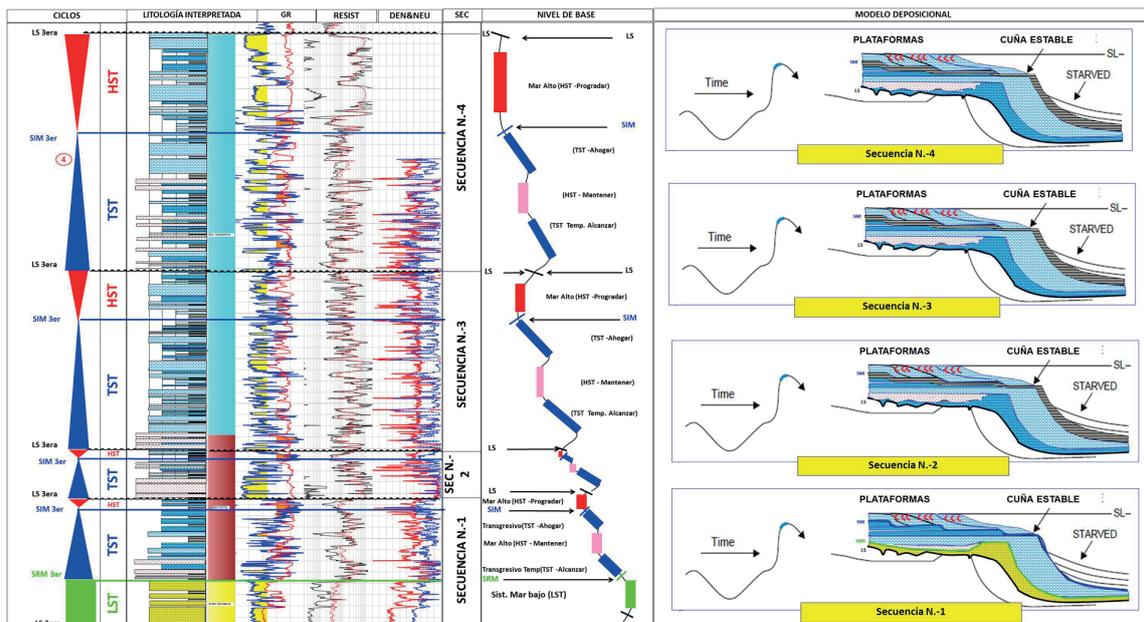


Figura N°10. Ciclo evolutivo de las unidades Tarma– Copacabana. Modelo deposicional propuesto aplicando la metodología de Estratigrafía de secuencias.

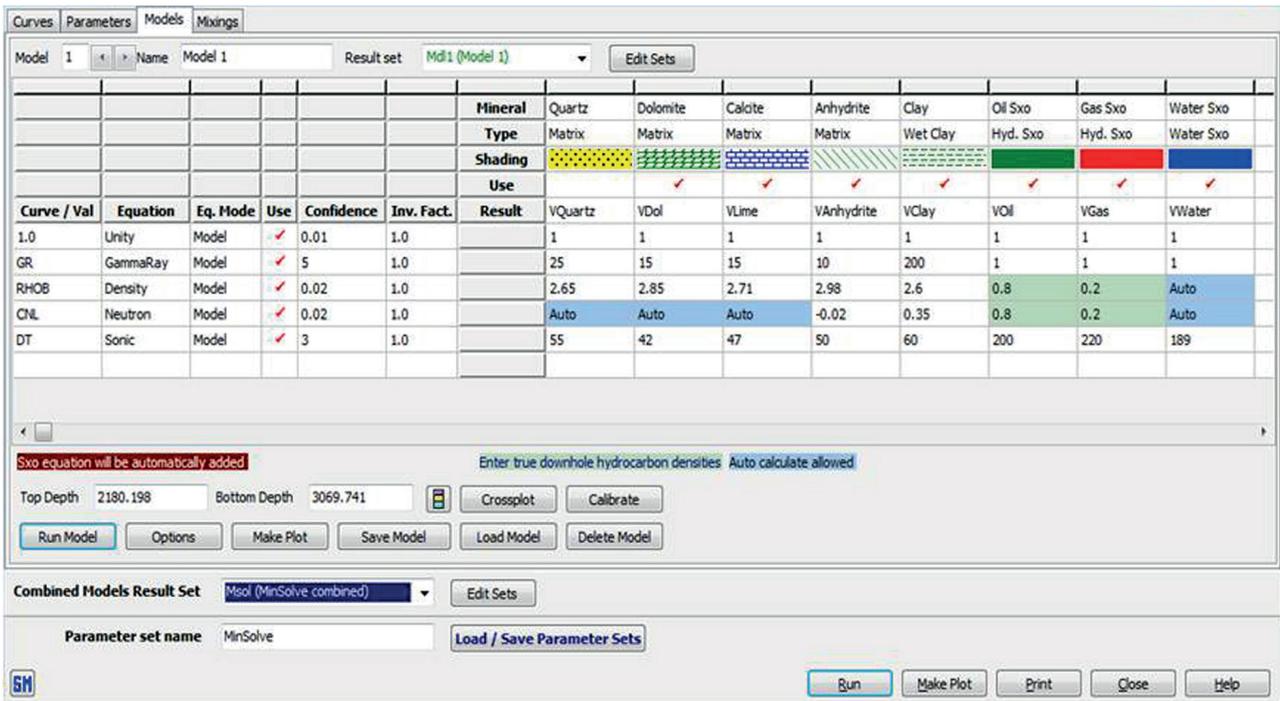


Figura N°11. Análisis multimineral, a partir de los perfiles eléctricos poder caracterizar litología y atributos de roca.

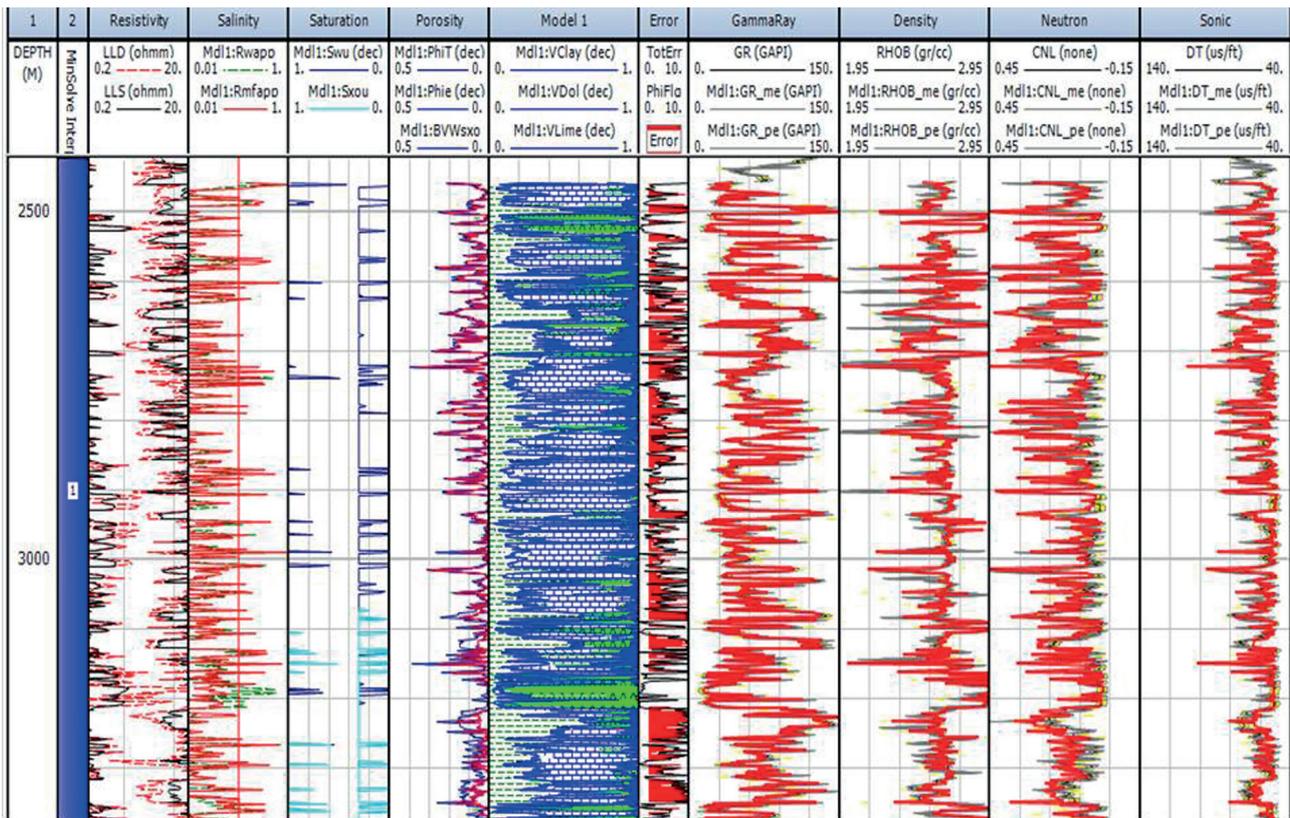


Figura N°12. Perfil de análisis multimineral y atributos petrofísicos

Tabla N°1. Parámetros para la evaluación de formaciones y definición de los atributos de roca

Subambiente	Salinidad (ppm)	Rw	Rhob mtx	a	m	n
Plataforma Somera	19000	@80_0.3	2.72	1	2.1	2
Playa	19000	@80_0.3	2.68	1	2	2

identificar litología y atributos de roca. Figura N° 11.

La Figura N°12 muestra el resultado del análisis multimineral, adicionalmente se aplicó el método de la ecuación de la saturación de agua en sus diferentes variantes, Archie, Simandoux, Indonesia, etc, Archie, G. (1952).

A partir de los núcleos e información de pruebas de formación de los pozos analizados se obtuvieron los parámetros petrofísicos como los exponentes de

cementación (m) y de saturación (n), resistividad de agua (Rw), y de los perfiles la resistividad de arcilla (Rtarc), densidad de la arcilla (Denarc), Tabla N°1.

Los delimitadores para la obtención de neto permeable (h) y porosidad efectiva (Phie) se obtuvieron a partir del método Schreiber.

Los resultados Porosidad, neto permeable y capacidad de almacenamiento y se integró a los sistemas encadenados

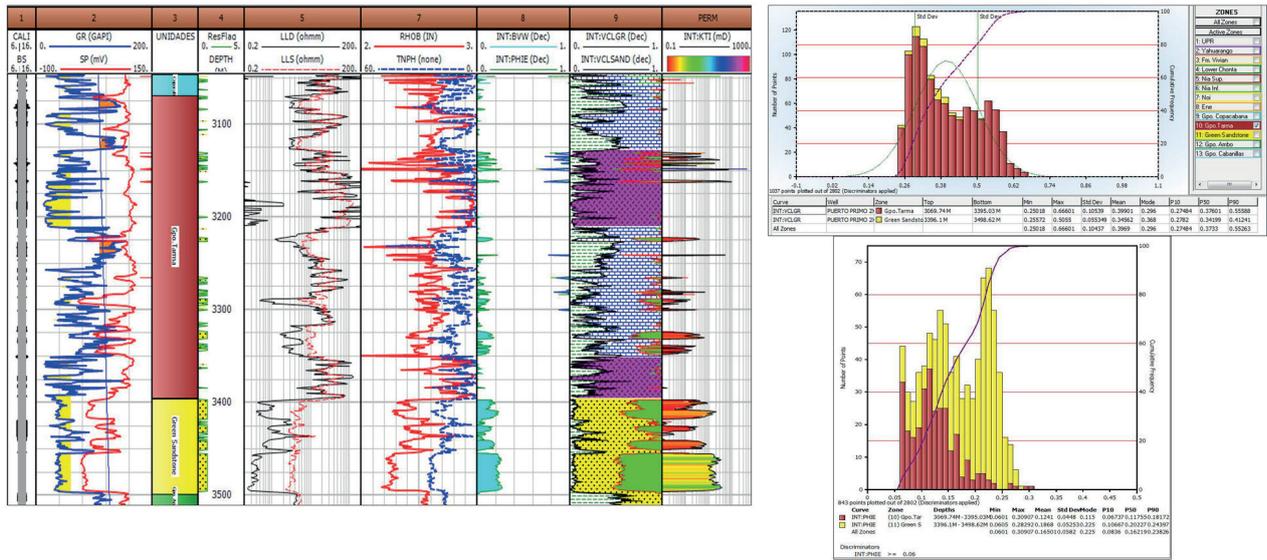


Figura N°13. Muestra los atributos de roca (Phi, K) (pistas 6, 7 y 8), obtenidos a partir de la evaluación petrofísica y los histogramas como delimitadores de Vcl y Phie .

Modelo de Plataforma de aguas poco profundas en 3er Orden Secuencia N.-1

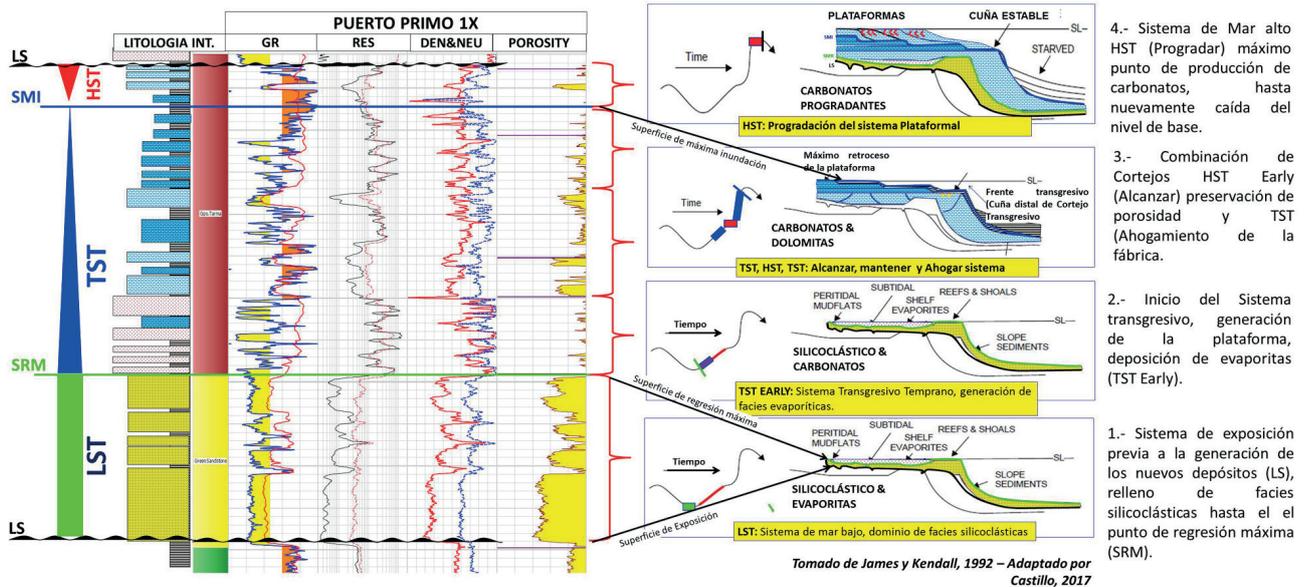


Figura N°14. Muestra la integración de la interpretación petrofísica al modelo deposicional, donde señala los potenciales reservorios dentro del modelo deposicional.

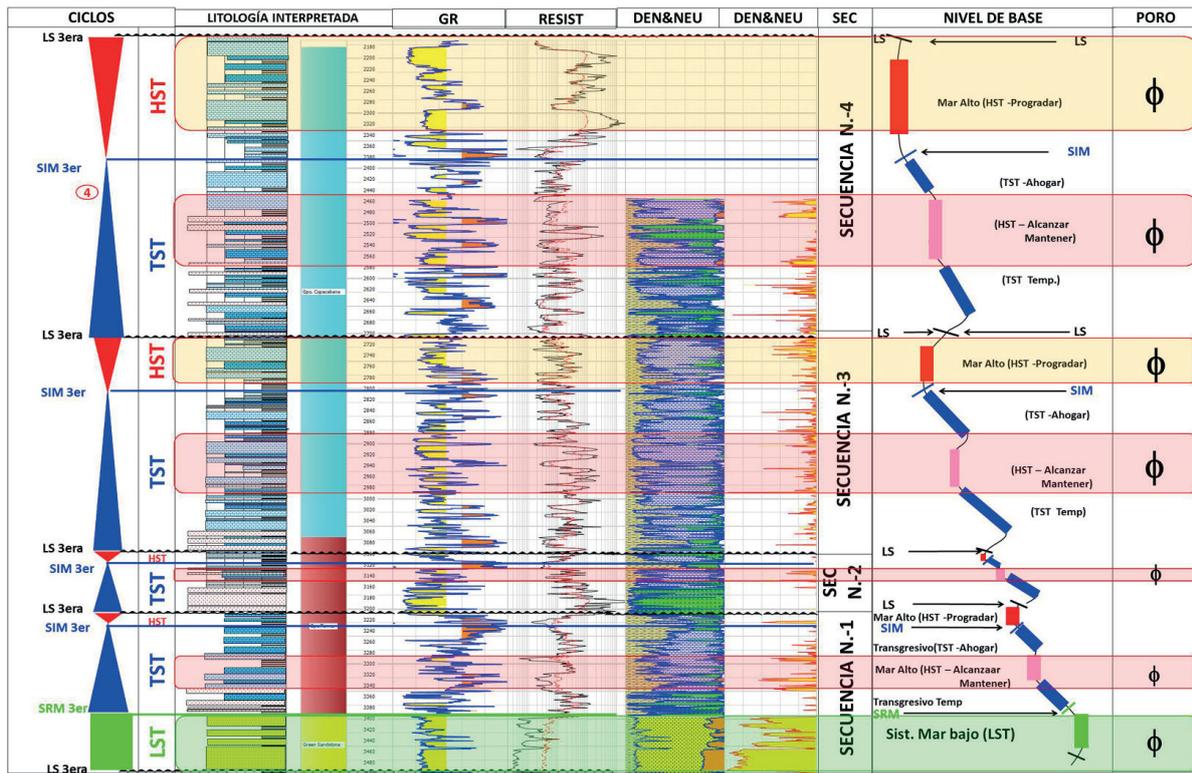


Figura N°15. Perfil tipo compuesto a partir de la integración de la Estratigrafía Secuencial y Petrofísica

identificados. Luego se relacionó al modelo secuencial y posicionó dentro del perfil tipo, Figura N°13.

Los niveles de porosidad y permeabilidad integrados al modelo deposicional, definen las potenciales roca reservorio en los Sistemas LST, HST (Alcanzar) y HST Progradar, Figura N°.-14.

3.5 Definición del Perfil Tipo

La Petrofísica fue realizada teniendo como base el modelo deposicional propuesto. La figura N°15, muestra el perfil tipo, que incluye: las secuencias estratigráficas, la litología interpretada, los perfiles eléctricos, la litología multimineral, los niveles de base, los sistemas encadenados, sus superficies estratigráficas y los niveles de porosidad posicionados dentro de cada sistema encadenado.

IV. CONCLUSIONES

- La interpretación integrada de perfiles permitió la definición de las electrofacies, las cuales asociadas han definido los subambientes y ambientes sedimentarios información de importación para la aplicación de la metodología de estratigrafía de secuencias.
- La aplicación de la metodología de la estratigrafía de secuencias ha permitido definir las superficies estratigráficas llaves con los cuales se definieron los sistemas encadenados que conforman las 4 secuencias estratigráficas determinadas dentro del sistema Tarma - Copacabana.

- De acuerdo a la información interpretada se define que en los grupos Tarma y Copacabana se identifican cuatro secuencias de 3er orden, dentro de los sistemas que va desde el sistema de mar bajo hasta el Sistema de mar alto.
- Los niveles de porosidad y permeabilidad integrados al modelo deposicional, definen las potenciales roca reservorio en los Sistemas LST, HST (Alcanzar) y HST Progradar.
- El perfil tipo servirá como perfil patrón para la elaboración de correlaciones y mapas de los diferentes subambientes, con el fin de obtener mapas de capacidad de almacenamiento de los niveles potenciales de porosidad posicionados en un modelo secuencial.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Mayor de San Marcos mi alma mater y a mi Escuela de Ingeniería Geológica que con sus profesores me ayudaron a poder elaborar este artículo.

Y un agradecimiento especial a mí Asesor de Tesis el Mg. Hugo Rivera Mantilla por su apoyo, la constante preocupación y aporte importante en la preparación de este artículo y a las Autoridades del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG por la publicación en la revista IIGEO.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Archie, G. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and Petrophysical considerations. *AAPG Bull* 36, memoir 2, p 278-298. <https://doi.org/10.1306/3D9343F7-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Dunham, R. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture – *In*: Ham, W.E., (Ed.). Classification of carbonate rocks. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. Memoir 1. p. 100-134.
- Flores Guerra, H. (2013). *Peru SAB Paleogeography*. Memoir 1, p. 1-15.
- James, N.P. y Kendall, A.C. (1992). Introduction to carbonate and evaporite facies models. *In*: WALKERS R.G. & JAMES N.P. (eds.) Facies models – response to sea level changes. p. 265-275. St. John's: Geological Association of Canada.
- Jones, B. y Desrochers, A. (1992). Shallow platform carbonates. *In*: Facies Models – Response to Sea Level Change (Eds R.G Walker and N.P. James). Geol. Ass. Canada, 277-301.
- PERUPETRO (2002). *Madre de Dios basin – Technical report, as part of The hydrocarbon potential of the southern sub andean Basins project*, memoir 1, p 21-27.
- Schlager, W. (1992). Sedimentology and Sequence Stratigraphy of reefs and carbonate Platforms: *American Association of petroleum Geologists* continuing Education Course note series, v, p. 34, 71.
- Schlager, W. (2002). *Sedimentology and Sequence Stratigraphy of carbonate rocks*: Amsterdam, Vrije Universiteit /Earth and Life Sciences, p. 146.
- Schlumberger (2009). Log interpretation chartbook 2009 edition, p.279-281
- Terra, G. (2010). Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim. Geociencias*. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9-29.

