

OBTENCIÓN DE LAS CURVAS RESISTIVIDAD, DENSIDAD Y NEUTRÓN A TRAVÉS DE REGISTROS DE NEUTRONES PULSANTES EN POZOS PERFORADOS CON LA TECNOLOGÍA “CASING DRILLING”

Federico Galliano¹, Facundo Arillo², Claudio Quintavalla²

1: Pan American Energy LLC, fgalliano@pan-energy.com

2: Halliburton Argentina SRL, facundo.arillo@halliburton.com, claudio.quintavalla@halliburton.com

Keywords: Neural Net Mature Fields Pulsed Neutron Casing drilling

ABSTRACT

A technology commonly used to reduce drilling times is the “*casing drilling*”. It consists of using the casing as drilling string as the well deepens, instead of the common drill pipe. In this way, the *casing drilling* system integrates the drilling and casing processes, making the construction of the well more efficient. Once the final depth is reached, the well is cemented, leaving it ready for completion. The greatest benefit of this technique is the optimization of costs associated with drilling. In return, this method prevents to execute Open Hole logging. Without these logs, it is not possible to know the depth of the reservoirs or perform a petrophysical analysis for the area of interest.

In order to define the well completion, neural nets training techniques have been implemented, to predict resistivity, density and neutron porosity for each well drilled using *casing drilling*. To achieve this, several training wells were strategically selected in the different areas where *casing drilling* was going to be performed. Each training well needs to have a triple combo open hole log, and cased hole pulsed neutron log.

Pulsed neutron log is key for this application since with it we obtain curves that respond to water formation salinity, hydrogen index and the density of the rock, which are used in the architecture of the neural networks to obtain the predicted triple combo (resistivity-density-neutron).

This paper explains the use and reach of neural networks. The project has more than 58 wells drilled and the results were compared with a test well to validate the methodology.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Zorro V se encuentra en el flanco norte de la cuenca del Golfo San Jorge, ubicándose en el sur de la concesión Cerro Dragón, a unos 80 km al oeste de Comodoro Rivadavia, Provincia de Chubut (Figura 1).

Se observa una estructura anticlinal con flancos tendidos, generada por el desplazamiento de la falla N3 que limita hacia el norte del yacimiento (Figura 2). Esta falla tiene vergencia hacia el norte y más de 200 metros de rechazo, dando como resultado el resalto positivo del bloque alto.

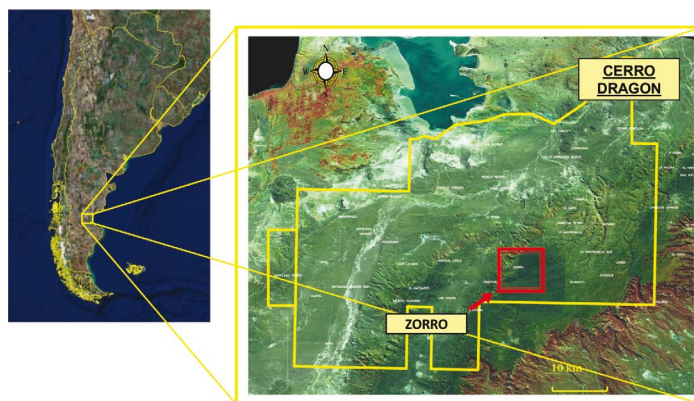


Figura 1. Ubicación geográfica de yacimiento Zorro

Al SE el anticlinal es cortado por una falla de rumbo ONO-ESE y su antitética de igual rumbo, llegando a alcanzar hasta 80 metros de rechazo vertical. Ambas generan una estructura de doble rollover cortado por una serie de pequeñas fallas de alivio.

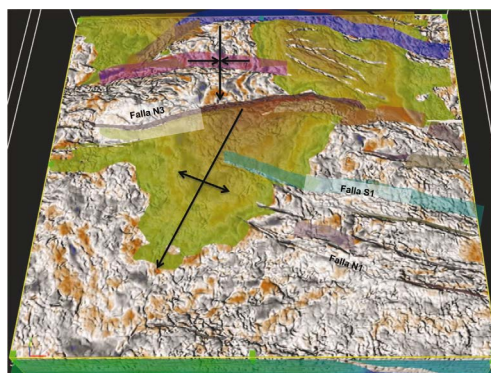


Figura 2. Mapa estructural del área

Las unidades productivas en la región son las Formaciones Comodoro Rivadavia y la sección superior de Mina El Carmen (Figura 3).

La Formación Comodoro Rivadavia, dónde se encuentran los reservorios analizados con la metodología presentada en este trabajo, presenta una litología caracterizada por abundancia de tobas líticas blancas, estratificadas en bancos delgados, areniscas blanco grisáceas y conglomerados, bien redondeados, con clastos volcánicos y cuarzo, areniscas tobáceas y pelitas de colores rojizos y amarillentos que suelen contener lentes de areniscas gruesas.

La depositación de arenas se encuentra en gran medida controlada por fallas y la mayoría de los cuerpos arenosos han sido depositados en ambientes de sistemas fluviales efímeros. Se han identificado en afloramientos, capas arenosas con arquitectura lobulada y mantiforme, internamente masivas o con estructuras de alto régimen de flujo, así como cuerpos lenticulares con entrecruzamientos (Hechem, J.J., 1998).

Obtención de las curvas resistividad, densidad y neutrón a través de registros de neutrones pulsantes en pozos perforados con la tecnología "Casing Drilling"

Periodo	Época	Edad	Sector Occidental / Faja Plegada	Flanco Norte	Flanco Sur	Megasecuencia	Eventos	Ambientes					
CUATERNARIO			"Rodados Patagónicos" = "Rodados Tehuelches"			Q	IV	POST TECTÓNICO	GLACIAL FLUVIAL				
TERCIARIO	NEÓGENO	PLIOCENO				Tc	III	COMPRESIÓN	FLUVIAL - EÓLICO				
		MIOCENO	Fm. Santa Cruz "Superpatagoniano"						MARINO LITORAL				
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	Fm. Patagonia					EXTENSIÓN	MARINO SOMERO				
		EOCENO	Fm. Sarmiento "Pyrotheriano" = "Tobas del Eoceno"						LOESS				
		PALEOCENO	Fm. Río Chico						FLUVIAL				
			Fm. Salamanca "Glaucónítico" "Salamanquense"			VULCANISMO	ESTUARINO						
CRETÁCICO	SUPERIOR	Senoniense	Maastrichtiano	"Chubutiano"	Fm. Laguna Palacios	Mb. Superior	Fm. Yacimiento El Trébol	Fm. Meseta Espinosa	Chubutiana	II	SAG	(PALEOSUELOS)	
			Campaniano		Fm. Bajo Barreal		Fm. Comodoro Rivadavia					Fm. Cañadón Seco	DELTAICO - FLUVIAL - LACUSTRE
			Santoniano			Mb. Inferior							FLUVIAL - LACUSTRE
			Coaniaciano		Fm. Castillo		Fm. Mina Del Carmen					VULCANISMO	
			Turoniano										FLUVIAL - LACUSTRE
			Cenomaniano		Fm. Matasiete		Fm. Pozo D-129					EXTENSIÓN	
	INFERIOR	Neocomiano	Aptiano						Mb. Los Alazanes		TRANSTENSIÓN		
			Barremiano										
			Hauteriviano										
			Valanginiano										
			Berriasiano										
JURÁSICO	MALM	Tithoniano	Fm. Pozo Río Mayo	Mb. Superior	Fm. Pozo Cerro Guadal		Neocomiana	I	RIFT TARDÍO	LACUSTRE - FLUVIAL			
		Kimmeridgiano		Mb. Inferior	Fm. Pozo Anticlinal Aguada Bandera					LACUSTRE			
		Oxfordiano											
	DOGGER	Calloviano	Complejo Volcánico Sedimentario = Grupo Lonco Trapial = Grupo Bahía Laura			C.V.S.	0	RIFT TEMPRANO	VOLCANICLÁSTICO				
		Bathoniano											
		Bajociano											
		Aaleniano											
	LIAS	Toarciano	Liásico			LIAS	PRE RIFT	MARINO SOMERO					
		Pliensbachiano											
		Sinemuriano											
		Hettangiano											
TRIÁSICO													
PÉRMICO													
CARBONÍFERO													
EOPALEOZOICO					Basamento Ígneo - Metamórfico								

Figura 3. Columna estratigráfica para la cuenca del Golfo San Jorge (modificado de Figari *et al.*, 1999, y Sylwan, 2001)

La típica geometría de estos depósitos muestra un incremento en sus volúmenes tanto en el sentido vertical, debido a su carácter multiepisódico, como en el sentido lateral, debido a amalgamamientos.

Regionalmente, esta unidad presenta espesores entre 200 y 300 m. en posiciones de flanco, y hasta 1000 y 1200 m. en sectores de centro de cuenca.

Evidenciando la continuidad de los reservorios, se muestra una correlación (Figura 4) entre pozos existentes del bloque en cuestión:

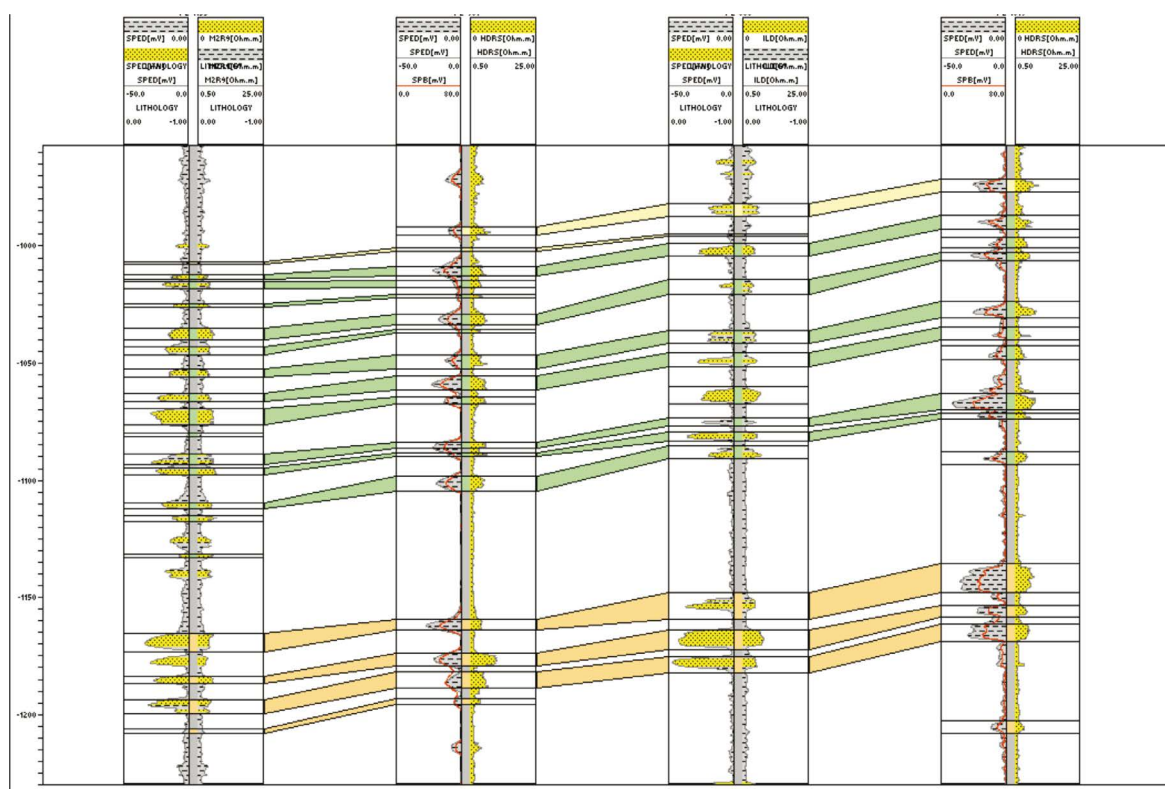


Figura 4. Hechem, J.J. (1998): Arquitectura y paleodrenaje del Sistema Fluvial efímero de la Formación Bajo Barreal, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. Boletín de Informaciones Petroleras, Buenos Aires.

IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA *CASING DRILLING*

Uno de los principales desafíos que enfrentan los proyectos de recuperación secundaria en el yacimiento Zorro, es el de controlar sus formaciones someras altamente depletadas. La baja presión a la que estos reservorios se encuentran sometidos, generan pérdida de circulación parcial o severa durante la perforación. La inyección de tapones obturantes y múltiples maniobras de control son un procedimiento común para mitigar esta contingencia, la cual se traduce en altos índices de tiempo no productivo, y baja calidad de cementación. A lo largo de los años, se probaron diversas tecnologías alternativas para contrarrestar estos resultados: como la utilización de tapones de gel cemento, diseños de triple cañería y hasta perforaciones de bajo balance, lo que trajo aparejado aumentos en los tiempos y costos de perforación. Por esta razón, se decidió comenzar a implementar la tecnología de perforación “*Casing drilling*”.

CASING DRILLING

Las operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas con inestabilidad en la perforación, zonas con altas admisiones o con sobrepresiones, son propensas a problemas operativos. En esas

operaciones de exploración y producción extraordinarias, la prevención de los inconvenientes y la recuperación suelen agregar mayores costos para los operadores, lo que hace necesario encontrar una metodología de perforación simple pero segura.

La técnica de *Casing drilling* consiste en revestir el pozo a medida que este es perforado ya que usa el casing como proveedor de la energía hidráulica y mecánica para lograr el corte de la formación. Con esta técnica se elimina la necesidad de bajar la columna de perforación convencional, que luego debe ser extraída para instalar la tubería de revestimiento permanente.

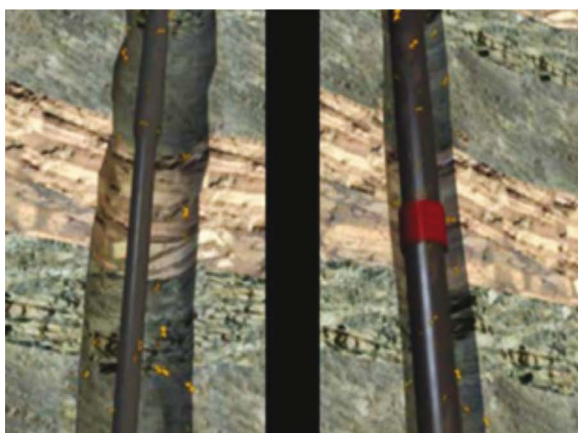
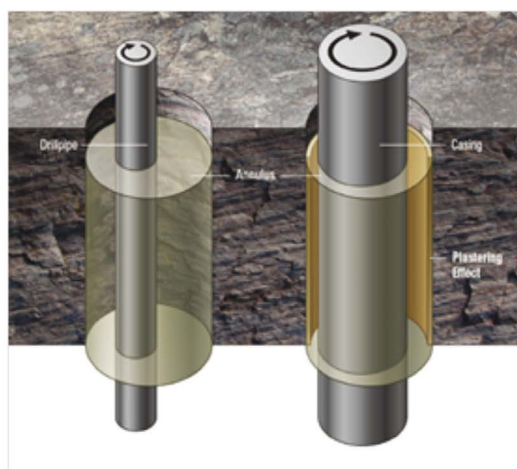


Figura 5. Perforación convencional vs. *Casing drilling*



Ventajas

- Reducción de tiempos y costo de construcción.
- Incremento en la seguridad durante la perforación.
- Eliminación de maniobras, manipuleo, armado y desarmado de elementos de distinto diámetro.
- Reducción del tiempo de exposición y daño a la formación.
- Reducción de costos en productos de lodo por pérdidas de fluido.

Desventajas

- Imposibilidad de registrar perfiles de pozo abierto con cable, se registra a pozo entubado durante la terminación.

Solución propuesta para obtención de registros a pozo entubado

En el yacimiento Zorro, se utilizan perfiles de triple combo para realizar las terminaciones de sus pozos. La curva Gamma Ray y la Resistividad son fundamentales para la definición por correlación de los reservorios. Las curvas densidad-neutrón junto con la resistividad son usadas

para realizar cálculos petrofísicos, tales como porosidad, permeabilidad, saturación de agua, etc..

Ante la imposibilidad de registrar a pozo abierto debido a la nueva metodología de perforación, se propuso una solución a pozo entubado, a fin de proveer la información necesaria para poder hacer una correcta evaluación de la Fm. Comodoro Rivadavia.

La propuesta se basa en predecir curvas de triple combo mediante la aplicación de Redes Neuronales utilizando el registro de neutrones pulsantes.

Herramienta de Neutrones Pulsantes

La herramienta de neutrones pulsantes de Halliburton (Figura 6) posee un diámetro de $2\frac{1}{8}$ ", el cual permite registrar a partir de tubings de $2\frac{7}{8}$ ". La elección de un diámetro de $2\frac{1}{8}$ " posibilitó la utilización de dos detectores de mayor diámetro (1.4 pulgadas) de germanato de bismuto. El uso de estos detectores de alta densidad, permite mejorar la detección de las cuentas provenientes de los rayos gamma de captura y obtener una resolución dos o tres veces mayor que otros sistemas del mercado. A su vez, esta mejora en la resolución, posibilita registrar en formaciones de baja porosidad, mientras que otras herramientas sólo lo pueden hacer mediante registros estacionarios.

Esta herramienta es ideal para la metodología del trabajo ya que sus curvas de salida responden a la salinidad, índice de hidrógeno y densidad de formación, que tienen relación directa con las curvas de registro abierto que se quieren predecir a través de las redes neuronales.

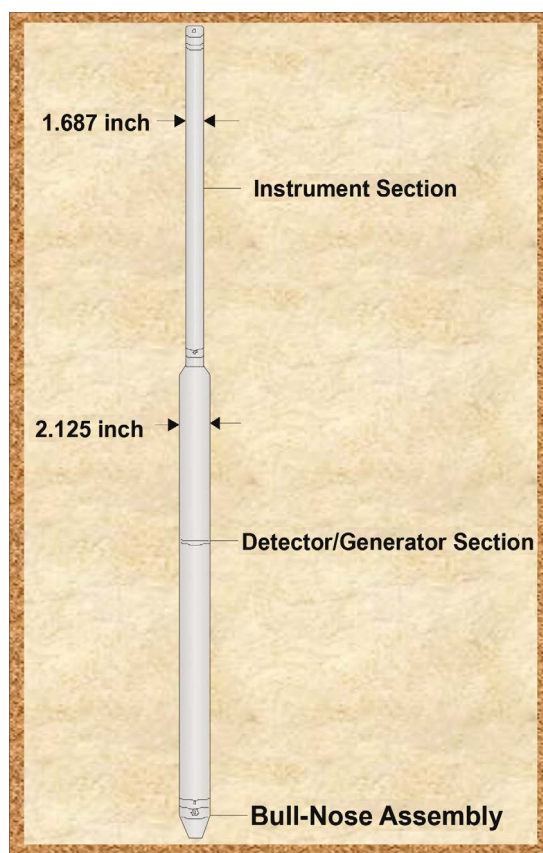


Figura 6. Herramienta de Neutrones Pulsantes

Introducción a las Redes Neuronales

Las redes neuronales (también conocidas como sistemas conexionistas) son un modelo computacional basado en un gran conjunto de unidades neuronales simples (neuronas artificiales), de forma aproximadamente análoga al comportamiento observado en los axones de las neuronas en los cerebros biológicos. Cada unidad neuronal está conectada con muchas otras y los enlaces entre ellas pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Cada

unidad neuronal, de forma individual, opera empleando funciones de suma. Puede existir una función limitadora o umbral en cada conexión y en la propia unidad, de tal modo que la señal debe sobrepasar un límite antes de propagarse a otra neurona. Estos sistemas aprenden y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita, y sobresalen en áreas donde la detección de soluciones o características es difícil de expresar con la programación convencional.

Las unidades de procesamiento se organizan en capas (Figura 7). Hay tres partes normalmente en una red neuronal: una capa de entrada, con unidades que representan los campos de entrada; una o varias capas ocultas; y una capa de salida, con una unidad o unidades que representa el campo o los campos de destino. Las unidades se conectan con fuerzas de conexión variables (o ponderaciones). Los datos de entrada se presentan en la primera capa, y los valores se propagan desde cada neurona hasta cada neurona de la capa siguiente. Al final, se envía un resultado desde la capa de salida.

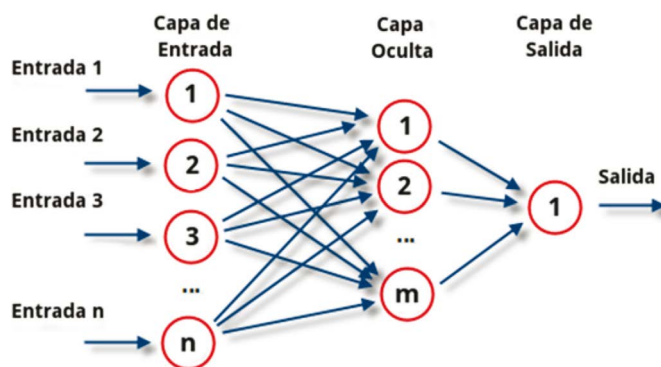


Figura 7. Unidades de procesamiento de la red neuronal

El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano, aunque las redes neuronales son más abstractas. Los proyectos de redes neurales modernas suelen trabajar desde unos miles a unos pocos millones de unidades neuronales y millones de conexiones que, si bien son muchas órdenes, siguen siendo de una magnitud menos compleja que la del cerebro humano, más bien cercana a la potencia de cálculo de un gusano.

Al principio, todas las ponderaciones son aleatorias y las respuestas que resultan de la red son, posiblemente, disparatadas. La red aprende a través del entrenamiento. Continuamente se presentan a la red ejemplos para los que se conoce el resultado, y las respuestas que proporciona se comparan con los resultados conocidos. La información procedente de esta comparación se pasa hacia atrás a través de la red, cambiando las ponderaciones gradualmente. A medida que progresa el entrenamiento, la red se va haciendo cada vez más precisa en la replicación de resultados conocidos. Una vez entrenada, la red se puede aplicar a casos futuros en los que se desconoce el resultado.

La arquitectura de las RN es capaz de predecir datos de triple combo con un alto grado de precisión utilizando datos de entrada obtenidos de dos fuentes: un registro de neutrones pulsantes y un triple combo de un pozo vecino.

Las RN generan registros de pozo abierto asignando un peso de procesamiento a las variables de entrada hasta que los resultados indiquen una coincidencia razonable con los datos de pozo abierto de un pozo de referencia. La técnica ayuda a las compañías operadoras a evaluar mejor su yacimiento cuando faltan datos debido a las condiciones de pozo, secciones de LWD que faltan, pozos viejos u otros factores.

Metodología del trabajo

La metodología del proyecto supone un pozo entrenador y un pozo de aplicación (Figura 8). El pozo entrenador debe tener registros de resistividad, densidad y neutrón (porosidad) y una vez entubado, se realiza un registro de neutrones pulsantes. El entrenamiento consiste en construir una arquitectura de redes la cual relaciona las curvas de salida de las RN con las del pozo abierto. Una vez obtenida la mejor relación entre las mismas, se la utilizará en el denominado pozo de aplicación.

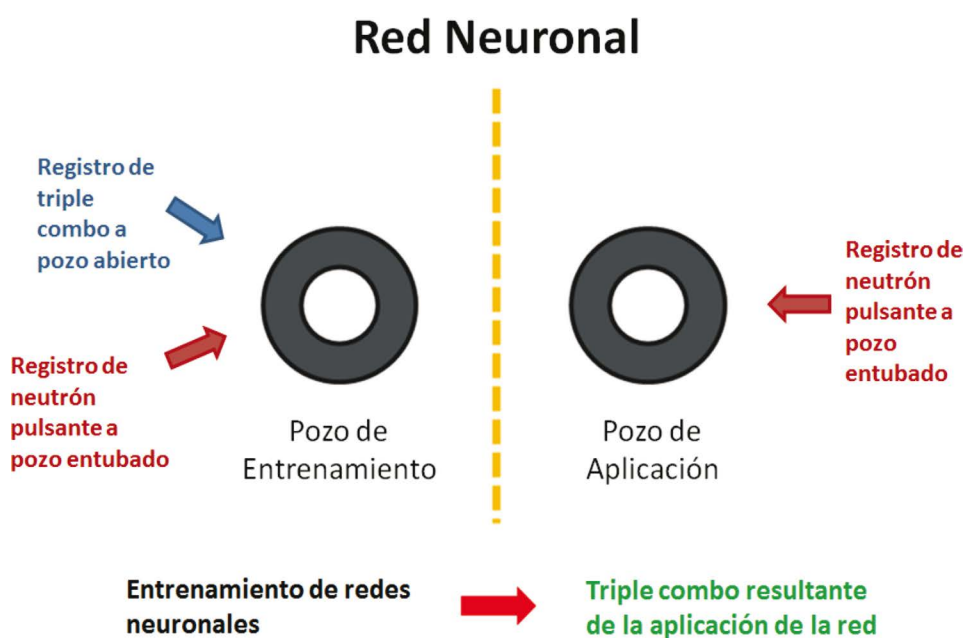


Figura 8. Representación de la metodología de trabajo

El pozo de aplicación, que es donde se quiere predecir las curvas de triple combo (resistividad, densidad y neutrón), sólo cuenta con un registro de neutrones pulsantes a pozo entubado. La estructura con redes neuronales lograda en el pozo de entrenamiento sumado al registro del pozo

de aplicación permiten la obtención de los registros de triple combo en el pozo de aplicación.

El registro de neutrones pulsantes es por excelencia la mejor opción para trabajar con redes neuronales para pozos que se perforan con la tecnología *casing drilling*.

Un dato no menor es que esta metodología aplica siempre y cuando exista una continuidad geológica entre el pozo entrenador y los pozos de aplicación. Por ejemplo, si el pozo entrenador contiene arenas arcillosas y el pozo de aplicación fue perforado en un área completamente diferente, los resultados no serán satisfactorios.

Para este proyecto se seleccionaron los pozos entrenadores en función del programa de perforación. El objetivo era contar con 4 ó 5 pozos entrenadores para maximizar el área de aplicación en el yacimiento (Figura 9). En función de donde se perforaba el pozo de aplicación, se seleccionaba el pozo entrenador más cercano a este.

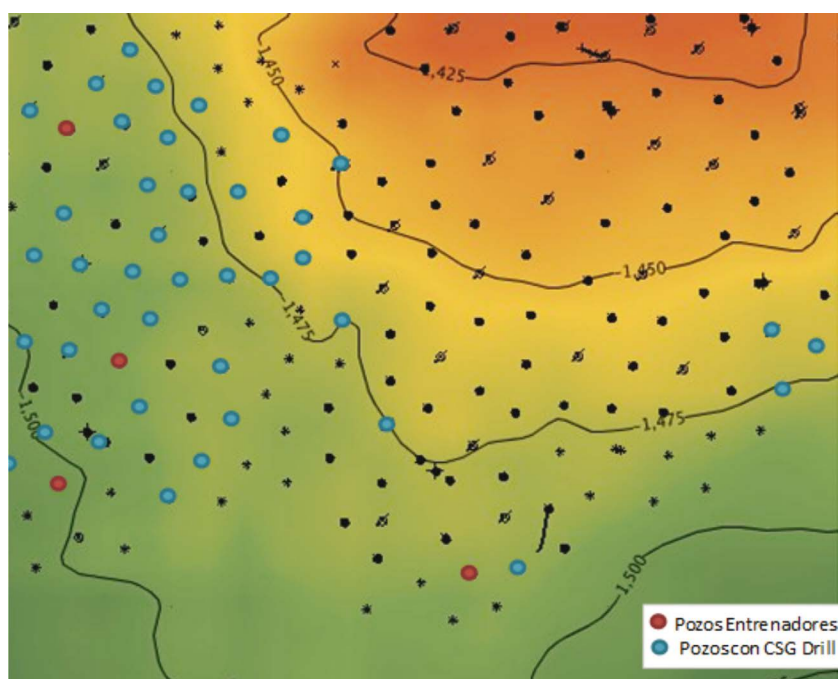


Figura 9. Distribución de pozos entrenadores y pozos de aplicación

Entrenamiento de las redes neuronales

Las curvas de entrada que se seleccionan para el procesamiento de redes neuronales son aquellas que tienen un comportamiento similar a las curvas que se quieren predecir. Por ejemplo, las curvas Sigma de formación y Sigma de pozo responden a la salinidad del agua de formación, al igual que lo hace la curva de resistividad. La relación de las cuentas inelásticas y de captura entre el detector cercano y lejano de la herramienta, responden a la densidad de la formación y al índice de hidrógeno respectivamente. Por eso, ambas curvas se utilizan para predecir la densidad de la

formación y la porosidad del neutrón.

Sumado a esto, también las redes neuronales se alimentan con curvas de elementos provenientes de la herramienta de neutrones pulsantes, tales como potasio, calcio y sílice para determinar con mayor precisión las arenas e intervalos arcillosos.

Por último, se utilizan curvas discriminadoras para descartar información no confiable. Uno de los discriminadores más importante es la curva de calibre, para un pozo perforado con un trépano de 8 1/2", se utiliza por ejemplo un valor tope de 11", es decir, todos los registros eléctricos obtenidos en un caliper mayor a 11" no son tenidos en cuenta en el procesamiento con redes neurales ya que seguramente estén afectados por la geometría del pozo.

A continuación se puede observar el resultado del entrenamiento de redes neuronales. En las tres gráficas (Figuras 10, 11 y 12), el eje X representa las curvas resistividad, densidad y neutrón de pozo abierto del pozo entrenador. En el eje Y se grafican las curvas de salida del entrenamiento de las redes neuronales.

Las redes neuronales realizan miles de iteraciones y el analista debe empezar a trabajar con los pesos de los distintos parámetros que constituyen las RN para lograr el resultado más óptimo. El objetivo es lograr un factor de correlación " R " > 0.8 para las tres curvas.

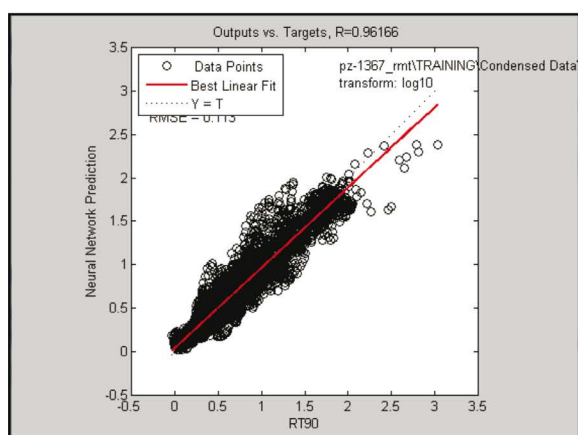


Figura 10. Entrenamiento R_t – $R=0.96$

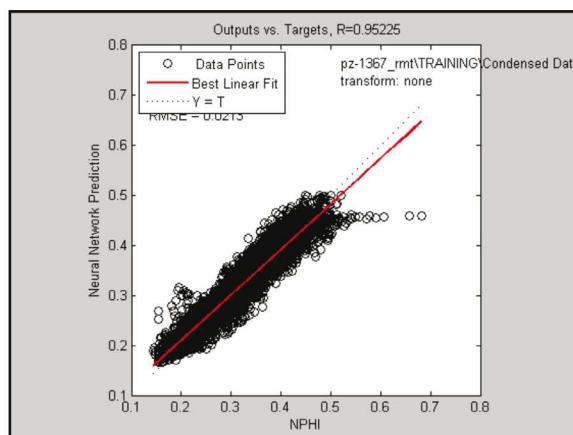


Figura 11. Entrenamiento Neutrón – $R=0.95$

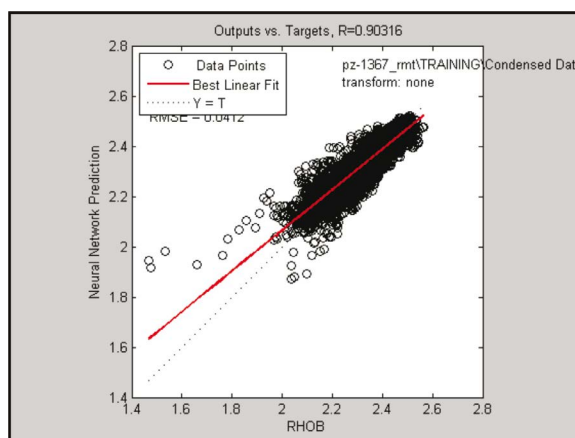


Figura 12. Entrenamiento Densidad – $R=0.90$

Las curvas de salida del entrenamiento fueron presentadas en formato de registro (Figura 13) para tener una mejor visualización de los resultados. Las curvas azules representan el resultado del entrenamiento y las rojas son las perfiladas a pozo abierto.

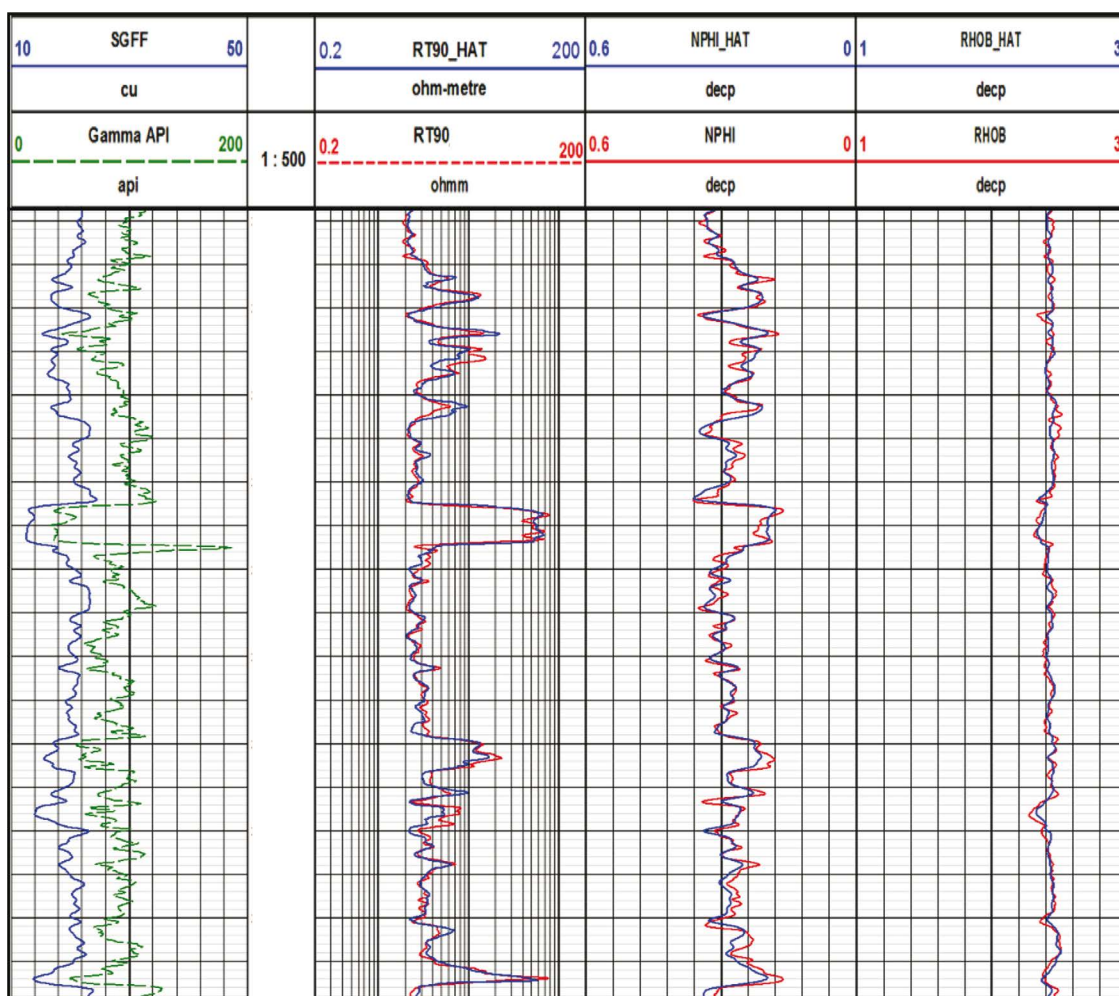


Figura 13. Comparación del resultado del entrenamiento versus curvas perfiladas a pozo abierto.

Una vez obtenida la relación más óptima para generar salidas de triple combo, se procede a utilizarla junto con un registro a pozo entubado de neutrones pulsantes en el antes denominado pozo de aplicación.

A continuación, se observa el triple combo resultante de la aplicación de la red neuronal (Figura 14).

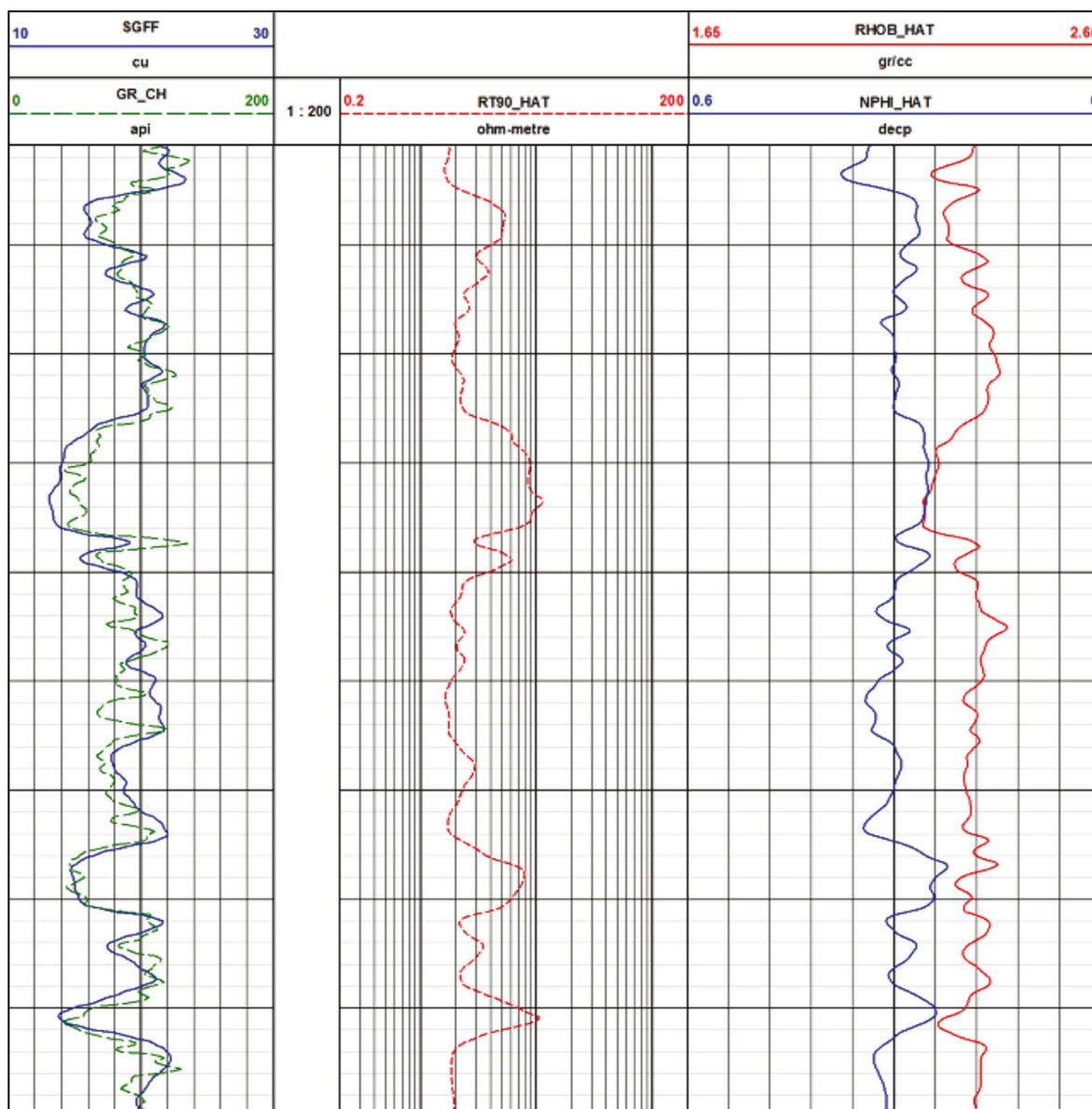


Figura 14. Triple Combo resultante de la aplicación de la RN.

VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Si bien se explicó teóricamente la metodología, luego de aplicarla en varios pozos, fue necesario contar con un método de validación robusto para poder determinar si las curvas de resistividad, densidad y neutrón que se obtenían de las redes neuronales serían las mismas que con registros convencionales a pozo abierto.

Para ello se seleccionó un pozo prueba donde una compañía de servicios hizo el registro a pozo abierto (resistividad, densidad y neutrón) y luego Halliburton obtuvo a través de las redes neuronales las mismas curvas.

En el gráfico de abajo (Figura 15) se puede apreciar la comparación de los resultados, donde se observa una excelente correlación. Las curvas negras con prefijo OH, son las perfiladas a pozo abierto, mientras que las curvas con sufijo HAT, son el resultado de la aplicación de la RN.

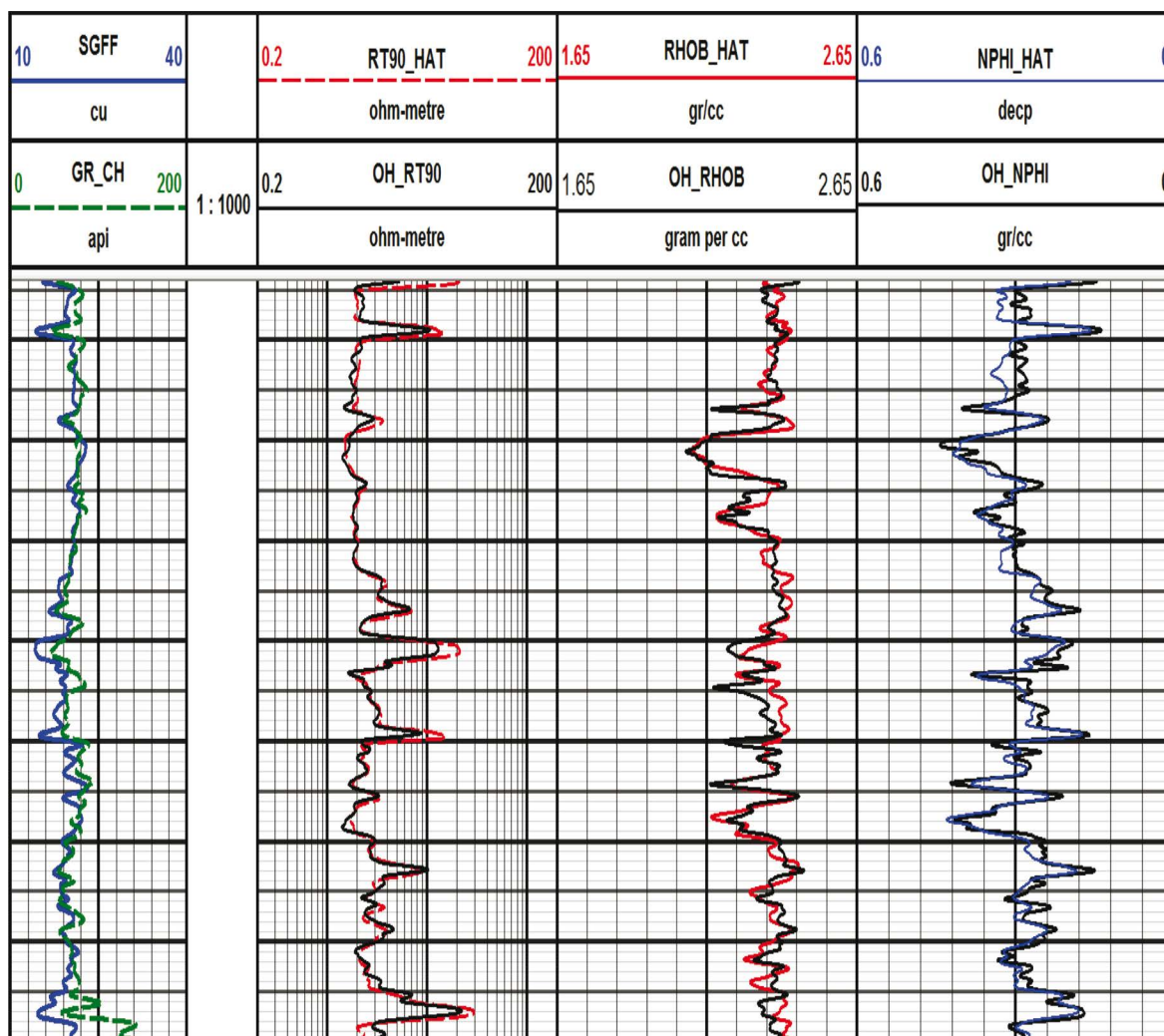


Figura 15. Comparación de curvas perfiladas a pozo abierto versus curvas de aplicación

CONCLUSIONES

- La aplicación de redes neuronales resulta ser una herramienta confiable para predecir registros de pozo abierto.
- La obtención de factores de correlación mayores a 0.9 y la validación de estos resultados con registros a pozo abierto, confirman la efectividad de la metodología.
- En los últimos 3 años, en el yacimiento Zorro se han perforado el 56% de sus pozos con tecnología *Casing drilling*. La aplicación de redes neuronales permitió un ahorro en costos de

perforación y terminación del 5%, y un ahorro en tiempos operativos del 20%, sin afectar el potencial de producción del yacimiento.

AGRADECIMIENTO

A Pan American Energy LLC. y Halliburton Argentina S.R.L por permitir la publicación de este trabajo. Al equipo de trabajo vinculado con la ejecución de tareas en campo, a quienes gracias a su dedicación y profesionalismo debemos los buenos resultados de las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Figari, E., Strelkov, E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R. y Villar, H., 1999. "Los sistemas petroleros de la cuenca del Golfo San Jorge. Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica". Boletín de Informaciones Petroleras, N°60: 54-90.
- Fitzgerald, M.G., Mitchum Jr., R.M., Uliana, M.A. and Biddle K.T., 1990. "Evolution of the San Jorge Basin, Argentina". AAPG Bulletin, v.74:879-920.
- Lesta, P.J., 1968. "Estratigrafía de la Cuenca del Golfo San Jorge". Actas III Jornadas Geológicas Argentinas, Buenos Aires, v.I: 171-182.
- Galford, J., Truax, J., Hrametz, A., and Haramboure, C. 2009. "A new neutron-induced gamma ray spectroscopy tool for geochemical logging". SP-WLA 50th Annual Logging Symposium Transactions, The Woodlands, Texas, U.S.A.
- Guo, W., Truax, J., Jacobson, L., Kwong, S., Dorffer, D., Wydrinski, R. 2007. "Pulsed Neutron Tool Responses In Propped Fractures And Gravel-packed Completions". In 48th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Simpson, G. A., Fox, P., Chafai, N., Truax, J. A. 2001. "Introduction Experiences of a New High Accuracy Through-Tubing Pulsed Neutron Reservoir Management Solution in Asia-Pacific". SPE 68713. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.