

Sistema híbrido de redes neuronales y sistemas expertos para la estimación de un modelo petrofísico a partir de los registros de pozo.

Héctor Díaz, Universidad Nueva Esparta; y Rafael Banchs, PDVSA-Intevep*

Resumen

Los registros de pozo consisten en las mediciones hechas a diferentes profundidades en un pozo petrolero con la finalidad de estimar características de la roca o el fluido. Estas mediciones pueden ser eléctricas, radioactivas, acústicas o de otros tipos. Luego de ser obtenidos, los registros de pozo son interpretados por un especialista en el área que posee una gran experiencia en este problema.

No existe un método que describa perfectamente como los registros de pozo se relacionan con las características petrofísicas obtenidas a partir de los mismos, y estos a su vez pueden contener datos erróneos debido a alteraciones sufridas en la medición. Por lo tanto la interpretación de registros no es una ciencia exacta y puede estar basada en cálculos numéricos, la experiencia, conocimientos empíricos o incluso heurísticos. De hecho la interpretación de registros ha sido calificada como un arte por parte de algunos especialistas.

El objetivo principal de este trabajo consistió en automatizar la interpretación de registros y estimar la litología, porosidad, permeabilidad, saturación y tipo de fluido en un intervalo de profundidad de un pozo por medio de la inteligencia artificial, específicamente usando redes neuronales y sistemas expertos. El sistema fue creado en los lenguajes de programación MATLAB y PROLOG y los resultados al ejecutar el programa son de tipo cualitativo basados en grupos difusos.

Summary

Well logs consist on the measures made at different depths in a petroleum well in order to estimate some rock or fluid characteristics. This measures can be of many types including electrical, radioactive, acoustic and others. After acquired, the well logs are interpreted by an expert in the area who needs a lot of experience in this problem in order to obtain a consistent result.

There is not a method who describes perfectly how the well logs are related to the petrophysical characteristics obtained from such logs. Furthermore, well logs can contain errors in their data due to some alteration in the measure process. Therefore, well log interpretation is not an exact science and is based on numeric calculations, experience, empiric knowledge or even heuristic knowledge. In fact, well log

interpretation has been qualified like an art by some experts in the area.

The main goal of this project consisted of automating the well log interpretation and estimate lithology, porosity, permeability, and type and saturation of fluids by using artificial intelligence techniques, specifically neural nets and expert systems. The system was created in the programming languages MATLAB and PROLOG and the results obtained by running the program are qualitative fuzzy levels.

Introducción

La exploración petrolera es una actividad sumamente compleja, en la que los costos para cualquier actividad de campo son extremadamente altos y normalmente no se trabaja en situaciones ideales, por lo que es primordial obtener resultados con la menor incertidumbre posible al tratar de usar todos los datos y metodologías disponibles e investigar todas las etapas del proceso.

Los registros de pozo forman parte de este ambiente donde predomina la incertidumbre. Estos son interpretados por un experto en el área de petrofísica, por lo que hay un factor subjetivo en el análisis y además este consta principalmente de métodos empíricos, gráficos o incluso heurísticos. De hecho algunos valores usados en las fórmulas de interpretación son elegidos a juicio del interpretador.

Ya en el pasado, se han hecho sistemas que automatizan la interpretación de un set de registros para caracterizar un yacimiento, pero la mayoría han estado basados en hacer los mismos cálculos que realizaría un experto siguiendo sus métodos convencionales. Por lo tanto, los resultados obtenidos no poseían sentido común y aún requerían de la asesoría de un experto para su interpretación.

En este proyecto se automatizó la interpretación de registros por medio de redes neuronales y sistemas expertos. Las redes neuronales son técnicas que buscan emular el funcionamiento neuronal del cerebro y por lo tanto resolver problemas en los que el cerebro es más apto que una máquina, mientras que los sistemas expertos son programas que buscan codificar los conocimientos de un especialista en un área muy específica y la forma en que estos son manejados.

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

Las redes neuronales tienen su principal aplicación en la identificación de patrones o en encontrar relaciones no lineales entre pares de entradas y salidas. Tienen la ventaja de que pueden resolver un problema sin tener que introducir el algoritmo para resolverlo y de que pueden evolucionar por medio del entrenamiento. La principal aplicación de los sistemas expertos es resolver problemas en un dominio de experticia muy específico de la misma forma en que lo haría un especialista.

A continuación se presenta una explicación detallada del sistema creado para luego pasar a las pruebas de campo y la validación.

Diagrama de bloques del sistema.

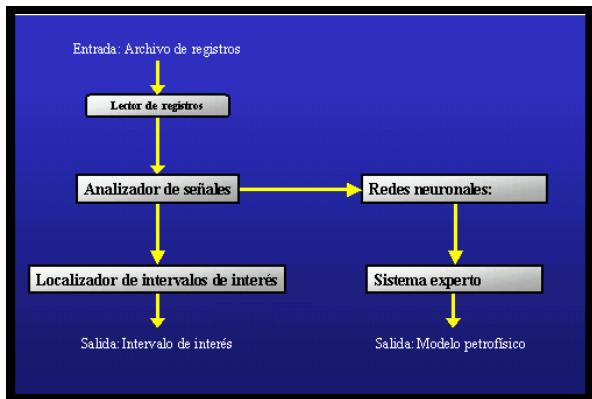


Fig. 1 Diagrama de bloques del sistema.

El sistema consta principalmente de cinco secciones: un lector de archivos de registro, un analizador de señales, un localizador de intervalos de interés, cinco redes neuronales y un sistema experto. Se puede decir que hay dos sistemas diferentes, uno encargado de obtener un intervalo de interés y otro encargado de estimar un modelo petrofísico.

Se trató que el sistema fuera lo más configurable posible de forma que el usuario tuviera a disposición todas las herramientas necesarias y que además se pudieran cambiar ciertos aspectos del código fuente de manera práctica y sencilla. De esta forma se pueden cambiar sin problemas algunos parámetros del analizador de señales, las constantes de entrenamiento de la red neuronal, la matriz de pesos de la red neuronal, los registros y atributos usados por el sistema para cada parámetro de salida, las reglas del sistema experto y muchas otras cosas más. También se minimizó la necesidad de tener conocimientos geofísicos para poder utilizar el programa, por lo que con sólo introducir el archivo del pozo y el intervalo de profundidad se puede obtener un estimado del modelo petrofísico de dicho intervalo. A continuación se presenta una explicación de la elaboración y funcionamiento de cada bloque.

Lector de encabezado de registros.

Un encabezado de un registro es la parte del archivo del registro donde se indican datos relevantes a la medición. En esta parte se encuentran datos sobre el área del pozo, los registros corridos y otros datos de interés. Este esquema sufre variaciones dependiendo de la compañía que haya dado el servicio de correr los registros por lo que no puede haber un formato general de lectura.

El lector de encabezados de registros de este sistema se encarga de crear varios archivos en formato ASCII con los valores de cada registro de pozo para luego ser cargados por el sistema. Se crean tres tipos de archivo: un archivo por cada registro usado en el proyecto, un archivo con los nombres de los registros existentes y un archivo conteniendo un programa en PROLOG con los datos relevantes sobre el pozo.

El lector de encabezado lee el archivo hasta encontrar los diferentes símbolos que usa cada compañía para preceder a cada tipo de datos, y luego lee dichos datos. Para solventar el problema de los diferentes símbolos y formatos usados por varias compañías, en el código fuente hay una base de datos con los símbolos precedentes a cada tipo de dato y una base de datos con los diferentes nombres dados por las compañías a cada tipo de registro. De esta forma al aumentar esta base de datos el lector se va haciendo más genérico y robusto. El lector de encabezados fue hecho en MATLAB.

Analizador de señales.

Al tomar los registros de pozo como señales discretas, el analizador de señales se convierte en el corazón del sistema. Es el encargado de procesar cada registro y obtener sus atributos, procesarlos, y codificarlos para que puedan ser usados por la red neuronal y el sistema experto.

El analizador de señales consiste en un conjunto de funciones para procesar señales (vectores) discretas. Estas funciones van desde el análisis visual hasta el uso de herramientas de procesamiento matemático. También pertenecen al analizador de señales las funciones de codificación y las utilidades creadas para resolver problemas puntuales. A continuación se presentan algunas de las funciones del analizador de señales:

1.- Las utilidades generales del analizador de señales se encargan de: leer el número de líneas de un archivo, crear un vector nuevo a partir de otro eliminando un valor predeterminado, cortar un segmento de un vector y crear otro con ese segmento, completar un vector con ceros hasta llegar a un tamaño predeterminado, eliminar filas o columnas de una matriz, eliminar líneas de un archivo, copiar un vector si no encuentra un valor preseleccionado,

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

agregar texto a un archivo, mostrar el contenido de un archivo, y obtener el valor en amplitud de un vector a partir de la introducción de un porcentaje sobre su valor pico-pico.

Las utilidades generales se encargan tanto de proveer las herramientas de procesamiento de vectores como de ayudar a generar la interfaz con el usuario. La función más importante es la de llevar todo valor de una señal a su relación con la amplitud pico-pico. De esta manera en vez de tener que introducirse valores particulares para cada registro, simplemente se introduce el valor porcentual de la amplitud pico-pico, lo que conlleva a una concepción de los valores totalmente visual en vez de requerir un conocimiento técnico para saber las unidades y valores considerados medios, altos o bajos para cada registro.

2.- Las funciones de análisis y procesamiento del analizador de señales se encargan de dividir una señal por cada vez que atravesase un valor y almacenar los resultados en un nuevo vector, dividir una señal de forma lineal o exponencial en varias zonas de amplitud y almacenarlo en una matriz, identificar los intervalos que tengan un valor pico mayor o menor a cierto valor, identificar los intervalos que tengan un valor promedio mayor o menor a cierto valor, y recorrer un intervalo de una señal desde sus límites izquierdo y derecho hasta llegar a un cambio de dirección de la pendiente y entonces agrandar el intervalo hasta esos nuevos límites.

Las funciones expuestas anteriormente están orientadas a proveer las herramientas para poder localizar intervalos de interés, y además procesar la señal para extraer ciertos atributos a ser introducidos en la red neuronal y el sistema experto.

3.- Las funciones de análisis matemático del analizador de señales se encargan de comparar el intervalo con varias formas preseleccionadas y elegir la forma con mayor índice de correlación, indicar el índice de correlación de la forma más parecida de la señal y analizar la regularidad de la señal al dividir el número de veces que cambia de dirección la pendiente entre los puntos de muestreo de la señal.

Estas funciones se encargan de extraer los atributos de los registros con la finalidad de ser introducidos en la red neuronal y el sistema experto.

Por último, el analizador de señales tiene funciones que se encargan de codificar la data obtenida por medio de las herramientas anteriores. De esta manera se crea un vector por cada registro donde un grupo de bits corresponde a cada atributo y donde cada bit de cada grupo corresponde a un estado del atributo correspondiente. Para esto se crean tantos bits como posibles valores de atributos haya, siendo esto totalmente configurable por parte del usuario.

También el analizador de señales codifica la data resultante con respecto al sistema experto. En este sentido el sistema se encarga de crear un programa en PROLOG de forma automática con los datos relevantes para que sirvan de entrada al sistema experto. Todo el analizador de señales fue realizado en MATLAB.

Seleccionador de intervalos de interés.

El seleccionador de intervalos de interés es un añadido al sistema general. Este trabajo fue realizado para la etapa de caracterización de yacimientos, por lo que ya se debería tener un intervalo de interés. Sin embargo, para lograr un sistema integral que fuera lo más independiente posible se implementó esta parte del programa, aunque requiere conocimientos técnicos para ser utilizada.

El seleccionador de intervalos de interés usa las herramientas de procesamiento del analizador de señales y maneja la señal resultante de un registro para encontrar sus valores picos, promedios, zonas específicas y otros valores. De esta forma con conocimientos sobre registros de pozo se pueden estimar posibles intervalos productores e introducirlos luego en la red neuronal y el sistema experto para obtener su modelo petrofísico. El seleccionador de intervalos de interés no es más que un conjunto de herramientas de procesamiento visual de señales que pueden ayudar a seleccionar un posible intervalo productor.

Redes neuronales.

Las redes neuronales se encargan de recibir la data del analizador de señal y de inferir la litología, porosidad, permeabilidad, tipo y saturación de fluido en el intervalo seleccionado. Hay una red neuronal por cada parámetro estimado y son redes de perceptrones competitivos.

Por cada red neuronal se tienen varias salidas posibles, donde cada salida corresponde a cada nivel del parámetro buscado. Por ejemplo, en la red neuronal de litología se tienen cuatro niveles correspondientes a arena limpia, arena arcillosa, arena muy arcillosa y lutita. Son niveles cualitativos difusos donde la pendiente entre cada grupo va a depender del entrenamiento dado a la red neuronal.

La red neuronal va a tener un número de filas en su matriz de pesos igual al número de salidas posibles, y un número de columnas igual al número de atributos posibles multiplicado por el número de tipos de atributos y el número de registros usados para cada red.

Las redes neuronales se pueden entrenar de forma manual o automática.

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

En el entrenamiento manual, el usuario debe introducir el intervalo de profundidad y su correspondiente salida, para esto se introducen los valores tope y base del intervalo y luego se indica el grupo difuso al que pertenece dicha profundidad.

Para entrenar la red de forma automática se debe tener un vector de interpretación en el archivo de registro y además indicar unos límites para cada grupo difuso, luego la red divide el vector de interpretación por cada vez que este atraviese los valores difusos límites introducidos y se entrena por cada intervalo creado hasta recorrer el tamaño total del registro. El modo de entrenamiento automático tiene otras variantes que consisten en preseleccionar ciertos intervalos y entrenar sólo con ellos, entrenar cada intervalo hasta que esté acorde con el vector de entrenamiento, entrenar un intervalo sólo si está en desacuerdo con el vector de entrenamiento, entrenar hasta que todos los intervalos estén acordes con el vector de entrenamiento, etc.

La red neuronal fue realizada en MATLAB y sus resultados también son codificados para crear de forma automática un programa en PROLOG que sirve como entrada al sistema experto.

Sistema experto.

Ya la red neuronal da un estimado de un modelo petrofísico indicando la confianza y la información faltante para cada resultado, pero también se tiene un sistema experto para complementar el sistema general y obtener un contraste en los resultados obtenidos por la red que pueden ayudar a tomar una decisión en casos de ambigüedad o reforzar un resultado en caso de concordancia.

El sistema experto no es un sistema experto convencional, y su mayor característica es, que a diferencia de los sistemas convencionales basados en conocimientos, no realiza ninguna pregunta al usuario. Todos los datos de entrada del sistema experto son elaborados por MATLAB al crear de forma automática varios programas en PROLOG basados en la existencia de los registros, los valores de cada registro, los datos al procesar los registros, los resultados de la red neuronal, etc.

El sistema experto realiza tres funciones: Agrega una semántica a los resultados de la red neuronal, realiza una interpretación basada en conocimientos usando registros y atributos diferentes a los usados por las redes neuronales, y cuantifica los resultados de las redes neuronales para obtener un índice de rentabilidad del pozo con su respectiva confianza e información faltante tanto para el contenido de hidrocarburos como para la facilidad de extracción del mismo.

El sistema experto fue realizado en PROLOG, el cuál es un lenguaje declarativo y simbólico basado en la lógica proposicional cuyas características corresponden casi en su totalidad a las características de los sistemas expertos. De esta forma se tuvo un sistema basado en los datos de campo y otro en los conocimientos teóricos funcionando en cascada.

Resultados.

A continuación se presentan los formatos en que el sistema presenta los resultados. Primero se muestran los resultados dados por la red neuronal, luego los resultados dados por el sistema experto basado en la red neuronal y por último la interpretación basada en conocimientos hecha por el sistema experto.

```
Intervalo:
Comienzo=1501
Fin=1600

Litología
arena muy arcillosa
Número de confianza 0.608696
Información faltante 0.000000

Tipo de fluido
gas
Número de confianza 0.661585
Información faltante 0.000000

Saturación
baja
Número de confianza 0.666667
Información faltante 0.000000

Porosidad
muy baja
Número de confianza 0.500000
Información faltante 0.000000

Permeabilidad
baja
Número de confianza 0.640000
Información faltante 0.000000
```

Fig. 2 Resultados generados por la red neuronal.

```
SEGUN LA RED NEURONAL.
Hay una probabilidad grande de que haya hidrocarburos porque la saturacion es muy alta
Hay una probabilidad muy grande de que haya gas porque la saturacion es muy alta y el hidrocarburo no fue
identificado como petroleo

Hay una probabilidad muy baja de que haya gran cantidad de hidrocarburos porque la porosidad es muy baja
Hay una probabilidad nula de que haya facilidad para extraer el hidrocarburo porque la permeabilidad es muy baja y
la litologia es lutita

Cuantificaciones sobre el estado del pozo con un total de 10 puntos posibles:
Indice sobre el contenido de hidrocarburos: 8
Indice sobre la cantidad y facilidad de extracción del hidrocarburo: 0
Confianza del indice de contenido de hidrocarburos: 3
Confianza del indice sobre la cantidad y facilidad de extracción de hidrocarburos: 4
Falta de información sobre el indice de contenido de hidrocarburos: 0
Falta de información sobre el indice de cantidad y facilidad de extracción de hidrocarburos: 0
```

Fig. 3 Resultados generados por el sistema experto sobre la red neuronal.

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

SEGUN EL SISTEMA EXPERTO.
 La litología es lutita o formaciones volcánica debido a lo siguiente:
 el valor del gammaray esta entre 30 y 75
 hay permeabilidad baja
 el valor del sonico es alto
 La saturacion es muy baja debido a lo siguiente:
 el valor del registro ilm es bajo
 el valor del registro ild es bajo
 La permeabilidad es muy baja debido a lo siguiente:
 el valor del sp es alto
 la resistividad es baja
 La porosidad es baja debido a lo siguiente:
 el valor del sonico es alto
 la densidad es alta
 el valor del neutron es alto
 La probabilidad de que exista gas es muy baja debido a lo siguiente:
 la resistividad es baja
 el valor del sonico es alto
 la densidad es alta

Aumenta la incertidumbre debido a lo siguiente:
 Litología
 no existe el registro caliper
 Saturación
 Permeabilidad
 no existe el registro caliper
 Porosidad
 Contenido de gas

Fig. 4 Resultados de la interpretación basada en conocimientos hecha por el sistema experto

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de campo y la consecuente validación del sistema al ejecutar la red y compararla con datos reales de interpretación. El procedimiento para la obtención de resultados fue el siguiente:

- 1) Se entrenó la red neuronal con un pozo de entrenamiento preferiblemente exploratorio
- 2) Se corrió la red neuronal en varios intervalos del pozo usado para el entrenamiento y se sacó el promedio de cada nivel al promediar todos los intervalos asignados en ese nivel.
- 3) Se corrió la red neuronal en un pozo no usado para el entrenamiento perteneciente a la misma región y se sacaron los promedios correspondientes a cada nivel de salida.

Hubo algunas variantes en el proceso que serán explicadas mas adelante. Los resultados fueron obtenidos usando pozos de un campo en el oriente de Venezuela, y se van a presentar los resultados en el siguiente orden: litología, porosidad, saturación de hidrocarburos, permeabilidad y tipo de hidrocarburo.

Resultados para litología.

Registros usados: Sp y Gammaray
 Atributos: Zona, forma y regularidad.
 Pozo de entrenamiento: POZO A

Resultados para el pozo POZO A:
 Promedio de arcillosidad del pozo: 0.6491

De 92 intervalos la red los identificó de la siguiente manera:

Nivel 1: Arena limpia. Número de intervalos: 11. Promedio de arcillosidad: 0.1972
 Nivel 2: Arena arcillosa. Número de intervalos: 11. Promedio de arcillosidad: 0.5135
 Nivel 3: Arena muy arcillosa. Número de intervalos: 39. Promedio de arcillosidad: 0.57225
 Nivel 4: Lutita. Número de intervalos: 31. Promedio de arcillosidad: 0.6491

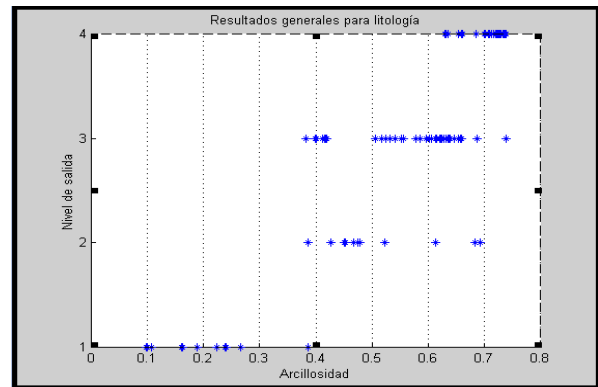


Fig. 5. Resultados de litología para el pozo POZO A.

En la figura se puede observar como las diferentes muestras para cada nivel de salida corresponden a varios promedios de arcillosidad, habiendo una progresión en la arcillosidad a medida que aumenta el nivel de salida cualitativo. De esta forma si un intervalo es ubicado en el nivel 3 se puede asumir que probablemente esté comprendido entre un 0.4 y 0.7 de arcillosidad con una media de 0.57225. Los niveles cualitativos no se refieren a valores numéricos específicos sino a su proporción con el promedio total del pozo. De esta manera el nivel uno puede ser considerado como arcillosidades muy bajas, el nivel dos como arcillosidades bajas, el nivel tres como arcillosidades altas y el nivel cuatro como arcillosidades muy altas.

Resultados para el pozo POZO B:

Promedio de arcillosidad del pozo: 0.6680
 De 70 intervalos la red los identificó de la siguiente manera:
 Nivel 1: Arena limpia. Número de intervalos: 8. Promedio de arcillosidad: 0.2403
 Nivel 2: Arena arcillosa. Número de intervalos: 10. Promedio de arcillosidad: 0.4031
 Nivel 3: Arena muy arcillosa. Número de intervalos: 32. Promedio de arcillosidad: 0.5882
 Nivel 4: Lutita. Número de intervalos: 20. Promedio de arcillosidad: 0.7121

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

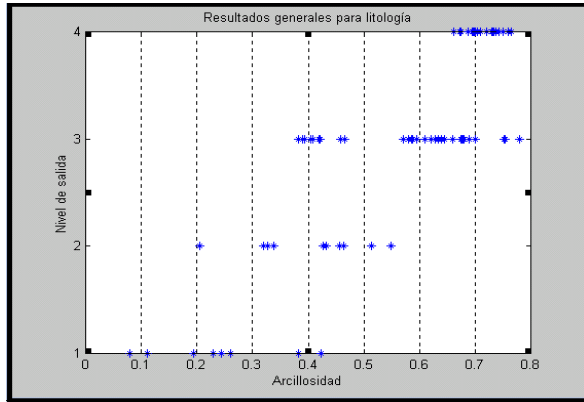


Fig. 6. Resultados de litología para el pozo POZO B.

Resultados para porosidad.

Registros usados: Neutrón, Gammaray, Ild e Ilm.
Atributos: Zona.
Pozo de entrenamiento: POZO C.

Resultados para el pozo POZO C:
Promedio de porosidad del pozo: 4.621 %
De 41 intervalos la red los identificó de la siguiente manera
Nivel 1: Porosidad muy baja. Número de intervalos: 20.
Promedio de porosidad: 0.8914 %
Nivel 2: Porosidad baja. Número de intervalos: 2. Promedio de porosidad: 3.63 %
Nivel 3: Porosidad alta. Número de intervalos: 7. Promedio de porosidad: 12.0018 %
Nivel 4: Porosidad muy alta. Número de intervalos: 12.
Promedio de porosidad: 16.1063 %

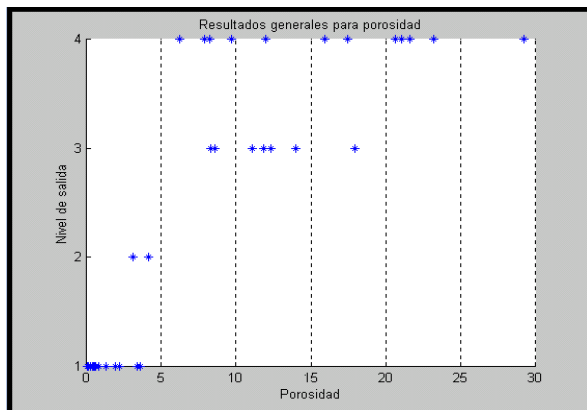


Fig. 7. Resultados de porosidad para el pozo POZO C.

Resultados para el pozo POZO D:

Promedio de porosidad del pozo: 2.3309 %
De 34 intervalos la red los identificó de la siguiente manera:
Nivel 1: Porosidad muy baja. Número de intervalos: 15.
Promedio de porosidad: 0.112 %
Nivel 2: Porosidad baja. Número de intervalos: 10.
Promedio de porosidad: 6.7454 %
Nivel 3: Porosidad alta. Número de intervalos: 0.
Nivel 4: Porosidad muy alta. Número de intervalos: 9.
Promedio de porosidad: 12.65 %

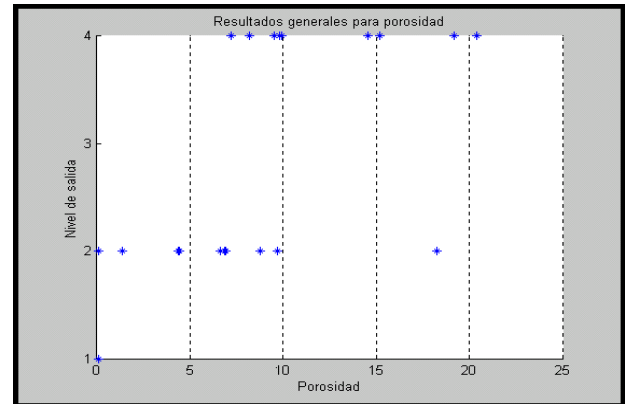


Fig. 8. Resultados de saturación de hidrocarburos para el pozo POZO D.

Lo más relevante con respecto a los resultados para la porosidad, además de la gran eficiencia del sistema, es el hecho de que ninguna de las muestras fue clasificada dentro del nivel 3. Esto puede ser debido al poco rango de valores de ese pozo, pues se puede observar que su promedio de porosidad es bastante bajo. De esta manera se evidencia que el usuario puede colocar un número de niveles de salida un poco más alto de lo apropiado y el sistema se encargará de autorregularlo.

Resultados para saturación de hidrocarburos.

Registros usados: Ild e Ilm.
Atributos de entrada de la red neuronal: Zona.
Pozo de entrenamiento: POZO C

Resultados para el pozo POZO C:
Promedio de saturación de hidrocarburo del pozo: 0.0465
De 43 intervalos la red los identificó de la siguiente manera
Nivel 1: Saturación muy baja. Número de intervalos: 14.
Promedio de saturación: 0.0003
Nivel 2: Saturación baja. Número de intervalos: 23.
Promedio de saturación: 0.1498

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

Nivel 3: Saturación alta. Número de intervalos: 5.
 Promedio de saturación: 0.4404
 Nivel 4: Saturación muy alta. Número de intervalos: 1.
 Promedio de saturación: 0.6694

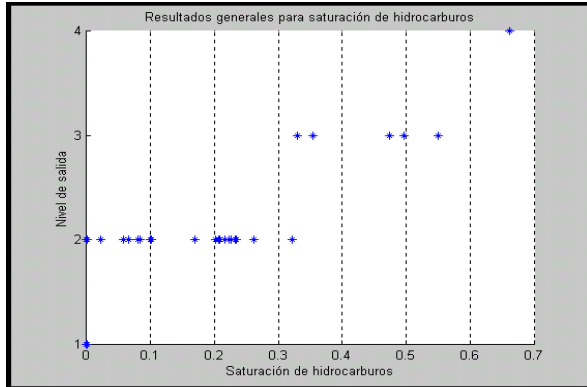


Fig. 9. Resultados de saturación de hidrocarburos para el pozo POZO C.

Resultados para el pozo POZO E:
 Promedio de saturación de hidrocarburo del pozo: 0.0201
 De 11 intervalos la red los identificó de la siguiente manera
 Nivel 1: Saturación muy baja. Número de intervalos: 5.
 Promedio de saturación: 0.0014
 Nivel 2: Saturación baja. Número de intervalos: 3.
 Promedio de saturación: 0.109
 Nivel 3: Saturación alta. Número de intervalos: 1.
 Promedio de saturación: 0.3301
 Nivel 4: Saturación muy alta. Número de intervalos: 2.
 Promedio de saturación: 0.7829

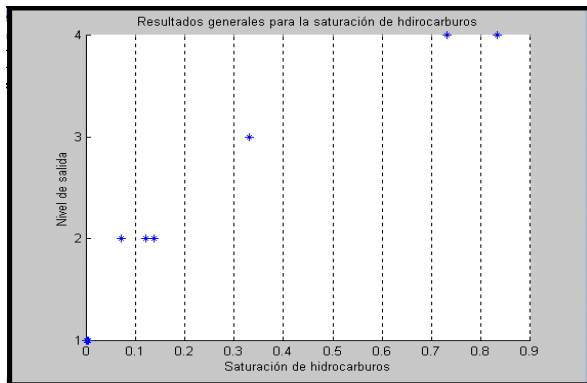


Fig. 10. Resultados de saturación de hidrocarburos para el pozo POZO E.

Resultados para permeabilidad.

Registros usados: Gammaray, Ild e Ilm.
 Atributos de entrada de la red neuronal: Zona.
 Pozo de entrenamiento: POZO C

Resultados para el pozo POZO C:
 Promedio de permeabilidad del pozo: 16.7502 mD
 De 50 intervalos la red los identificó de la siguiente manera
 Nivel 1: Permeabilidad muy baja. Número de intervalos: 26.
 Promedio de permeabilidad: 3.3817 mD
 Nivel 2: Permeabilidad baja. Número de intervalos: 6.
 Promedio de Permeabilidad: 17.707 mD
 Nivel 3: Permeabilidad alta. Número de intervalos: 11.
 Promedio de Permeabilidad: 223.43 mD o 28.52 mD
 Nivel 4: Permeabilidad muy alta. Número de intervalos: 7.
 Promedio de Permeabilidad: 60.85 mD

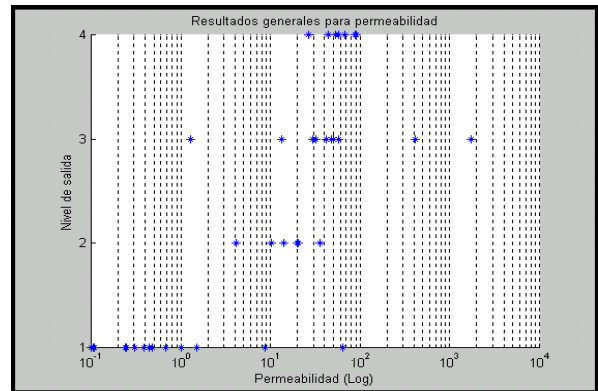


Fig. 11. Resultados de permeabilidad para el pozo POZO C.

Resultados para el pozo POZO D:
 Promedio de permeabilidad del pozo: 4.6164 mD
 De 26 intervalos la red los identificó de la siguiente manera
 Nivel 1: Permeabilidad muy baja. Número de intervalos: 10.
 Promedio de permeabilidad: 0.1741 mD
 Nivel 2: Permeabilidad baja. Número de intervalos: 12.
 Promedio de permeabilidad: 15.429 mD
 Nivel 3: Permeabilidad alta. Número de intervalos: 1.
 Promedio de permeabilidad: 38.68 mD
 Nivel 4: Permeabilidad muy alta. Número de intervalos: 3.
 Promedio de permeabilidad: 57.15 mD

Debe tenerse en cuenta que la permeabilidad es medida de forma exponencial.

Resultados para tipo de hidrocarburo.

Ya por la saturación se puede saber si el intervalo contiene o no hidrocarburos, por lo tanto una forma de resolver el problema de saber el tipo de hidrocarburo consistió en

Redes neuronales y sistemas expertos para la interpretación de registros de pozo

sobre entrenar una red usando los registros de saturación empleando la mayor cantidad de atributos y entrenando de forma automática con la finalidad de que la red se caracterice con el hidrocarburo más común. Luego si la red en otro pozo identifica un intervalo como hidrocarburo, entonces se puede asumir que probablemente sea el mismo hidrocarburo que haya estado más presente en el pozo de entrenamiento

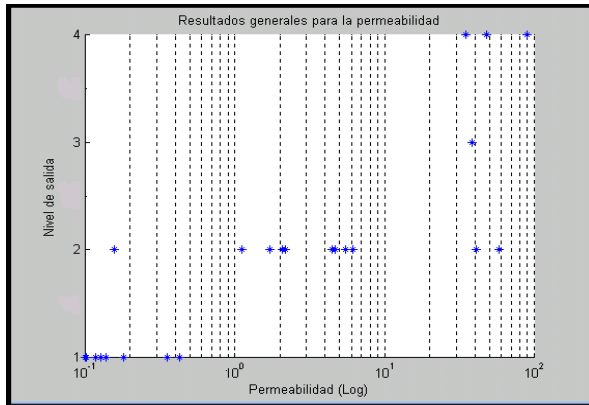


Fig. 12. Resultados de permeabilidad para el pozo POZO D

Conclusiones.

Con este trabajo se obtuvo una nueva forma de estimar un modelo petrofísico. El estudio realizado muestra como se pueden aplicar técnicas de inteligencia artificial como redes neuronales y sistemas expertos a este problema y obtener rangos de valores cualitativos que den una respuesta rápida y confiable sobre las características de un pozo con sólo introducir un conjunto de registros y el intervalo a estudiar.

Los aportes resultantes de este trabajo son los siguientes:

- Se está proponiendo una metodología de trabajo para la elaboración de un sistema de inteligencia artificial para la interpretación de registros, además de proponer una metodología de trabajo para cualquier sistema que conste de una red neuronal y un sistema experto trabajando en cascada
- Se está obteniendo un sistema que puede evolucionar por medio del entrenamiento y se puede adaptar a un razonamiento particular
- Se obtienen resultados cualitativos, por lo que se reduce la necesidad de complementar el sistema con el asesoramiento de un especialista.
- Hay una disponibilidad total de la información resultante de la interpretación de registros a un bajo costo de mantenimiento.

- Ayuda a encontrar relaciones entre las señales(registros) y los parámetros buscados.
- Se obtiene un complemento de los métodos convencionales y ayuda a los interpretadores a tomar decisiones en casos donde exista ambigüedad en los resultados o reforzar sus criterios en los casos donde estos concuerden.
- Se pone a disposición una respuesta rápida, eficiente y clara sobre la interpretación de registros a cualquier persona que requiera dichos conocimientos. Además el sistema trabaja con datos incompletos, y se puede obtener un resultado así hayan errores o alteraciones en las mediciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a PDVSA Intevep por su soporte y autorización para publicar estos resultados.

Referencias.

- Allen G., A. Coadou y F. Mercier (1994): Siliclastic reservoir sedimentology. París. Editorial Cepet.
- Baldwin, J. y D. Otte. (1989): *Computer emulation of human mental processes: application of neural networks simulators to problemas in well log interpretation*. En: Society of Petroleum Engineers, número 19619.
- Dewan, John (1984): *Modern open-hole log interpretation*. Nueva York. Editorial PennWell.
- Einstein E. y K. Edwards. (1990): *Comparison of an expert system to human experts in well-log analysis and interpretation*. En: Society of Petroleum Engineers, número 18129.
- Hearst Joseph, P. Nelson y F. Paillet (2000): *Well logging for physical properties*. Chichester. Editorial Wiley.
- Horn, M., M. Aime y H. Slack (1962): *COMLOG: A comprehensive computer system for log interpretation*. En: Society of Petroleum Engineers, número 275.
- Mayer, C. y A. Sibbit (1980): *GLOBAL, A new approach to computer-processed log interpretation*. En: Society of Petroleum Engineers, número 9341.
- Serra, Oberto (1986): *Fundamentals of well-log interpretation*. Montrouge. Editorial Elsevier.