

Pytrophysics

Manual de usuario

v1.2 - Julio de 2023

Contenido

A1. Instalación y ejecución	4
A2. Manejo de pozos	7
A2.1. Crear un pozo	7
A2.2. Agregar información al pozo	8
A2.3. Cargar un pozo previamente creado	9
A3. Manejo de información de las curvas	12
A4. Caracterización	14
A4.1. Vshale	14
A4.2. Litologías	17
A4.3. Porosidad total	20
A4.4. Porosidad efectiva	23
A4.5. Saturación de agua	24
A4.6. Permeabilidad	30
A4.7. K PHI	36
A4.8. Swirr	37
A4.9. Parámetros de Corte	38
A4.10. Gráfico de espesores	41
A4.11. Crossplot libre	43
A4.12. Gráficos de propiedades de matriz	44
A4.13. Crossplot M-N y Rhomma-Umma	45
A4.14. Identificación mineral GR espectral	47
A4.14. Crossplot de Picket	49
A4.15. Crossplot de Hingle	50
A4.16. Crossplot de Buckles	51
A4.17. Histogramas	52
A4.18. Índice de productividad	55
A5. Manejo de curvas de profundidad	60
A6. Referencias	65

Imágenes

Fig. F.1: opción de descompresión con Winrar.
Fig. F.2: nombre del archivo ejecutable.
Fig. F.3: ejemplo de un cartel de sospecha de antivirus.
Fig. F.4: ejemplo de confirmación de falso positivo del antivirus.
Fig. F.5: interfaz principal de la aplicación.
Fig. F.6: ejemplo de búsqueda de la aplicación por el nombre.
Fig. F.7: opción de crear pozo.
Fig. F.8: cartel para elegir el nombre del pozo.
Fig. F.9: ejemplo del guardado del pozo.
Fig. F.10: opción para agregar información de curvas a través de un archivo LAS.
Fig. F.11: ejemplo de archivo elegido.
Fig. F.12: selección del archivo LAS del pozo para poder cargarlo.
Fig. F.13: información del pozo cargado.
Fig. F.14: pozo seleccionado.
Fig. F.15: opciones de la pestaña "Editar LAS".
Fig. F.16: ejemplo de visualización de las curvas del pozo.
Fig. F.17: opciones de creación o borrado de curvas en la pestaña de "Editar curvas".
Fig. F.18: opciones de modificaciones de curvas en la pestaña de "Editar curvas".
Fig. F.19: visualización directa de la información cargada al pozo en la aplicación.
Fig. F.20: ejemplo del cálculo de VShale con el método de GR.
Fig. F.21: usando múltiples grupos en el cálculo de *VShale*.
Fig. F.22: menú del solver de minerologías.
Fig. F.23: ejemplo de visualización de las litologías.
Fig. F.24: menú para agregar litologías.
Fig. F.25: ejemplo de cálculo de porosidad total, a través del método de densidad.
Fig. F.26: comparación de la porosidad total sin ajuste de rango y con un ajuste...
Fig. F.27: menú para el cálculo de porosidad.
Fig. F.28: pantalla para el cálculo de la temperatura.
Fig. F.29: pantalla para el cálculo de la resistividad del agua.
Fig. F.30: pantalla para el cálculo de la saturación de agua.
Fig. F.31: pantalla para el cálculo de la saturación de gas y petróleo.
Fig. F.32: pantalla para el cálculo de la permeabilidad a través de Tixier.
Fig. F.33: pantalla para la predicción de permeabilidad utilizando Random Forest.
Fig. F.34: ejemplo de scatterplot que muestra la relación entre predicciones...
Fig. F.35: pantalla para la predicción de permeabilidad utilizando XGBoost.
Fig. F.36: pantalla para la predicción de la permeabilidad utilizando AdaBoost.
Fig. F.37: ejemplo de las salidas de la pantalla de KPHI.
Fig. F.38: pantalla para el cálculo de Swirr.
Fig. F.39: ejemplo de gráfico de parámetro de corte C1 para Vshale.
Fig. F.40: ejemplo cálculo de C2, reutilizando el valor de cutoff C1.
Fig. F.41: ejemplo de referencia gráfica para el valor de cutoff C3.
Fig. F.42: ejemplo de ingresos de curvas para el cálculo de espesores.
Fig. F.43: ejemplo de análisis de espesores.
Fig. F.44: ejemplo de gráfico de dispersión con tres variables.
Fig. F.45: ejemplo de crossplot "densidad-pef".
Fig. F.46: ejemplo de crossplot M-N.
Fig. F.47: ejemplo de crossplot Rhomma-Umma.
Fig. F.48: ejemplo de gráfico de dispersión de torio-potasio.
Fig. F.49: secciones para la identificación de mineralogía espectral GR utilizando...
Fig. F.50: ejemplo de crossplot de Picket con eje de profundidad.
Fig. F.51: ejemplo de crossplot de Hingle.
Fig. F.52: ejemplo de crossplot de Buckles.
Fig. F.53: menú del histograma.
Fig. F.54: ejemplo de contraste de la distribución de una curva con una distribución normal.
Fig. F.55: ejemplo del contraste entre una curva y una distribución.
Fig. F.56: ejemplo de histograma con 300 buckets.
Fig. F.57: ejemplo de cálculo de Darcy.

Fig. F.58: ejemplo de cálculo de Voguel.
Fig. F.59: ejemplo de cálculo de Brown.
Fig. F.60: ejemplo de cálculo de Klinks-Clark.
Fig. F.61: ejemplo de cálculo de Fetkovich.
Fig. F.62: menú de curvas de profundidad.
Fig. F.63: ejemplo de pista realizada por el usuario.
Fig. F.64: ejemplo de relleno entre curvas.
Fig. F.65: ejemplo de combinación de modificaciones...
Fig. F.66: ejemplo de modificación de una pista resultante de un cálculo.

A1. Instalación y ejecución

El programa se [descarga](#) en un archivo comprimido ZIP. Se puede descomprimir haciendo clic derecho sobre el archivo descargado, y luego "extraer todo". En caso de tener Winrar, la opción que aparece es "extraer aquí".

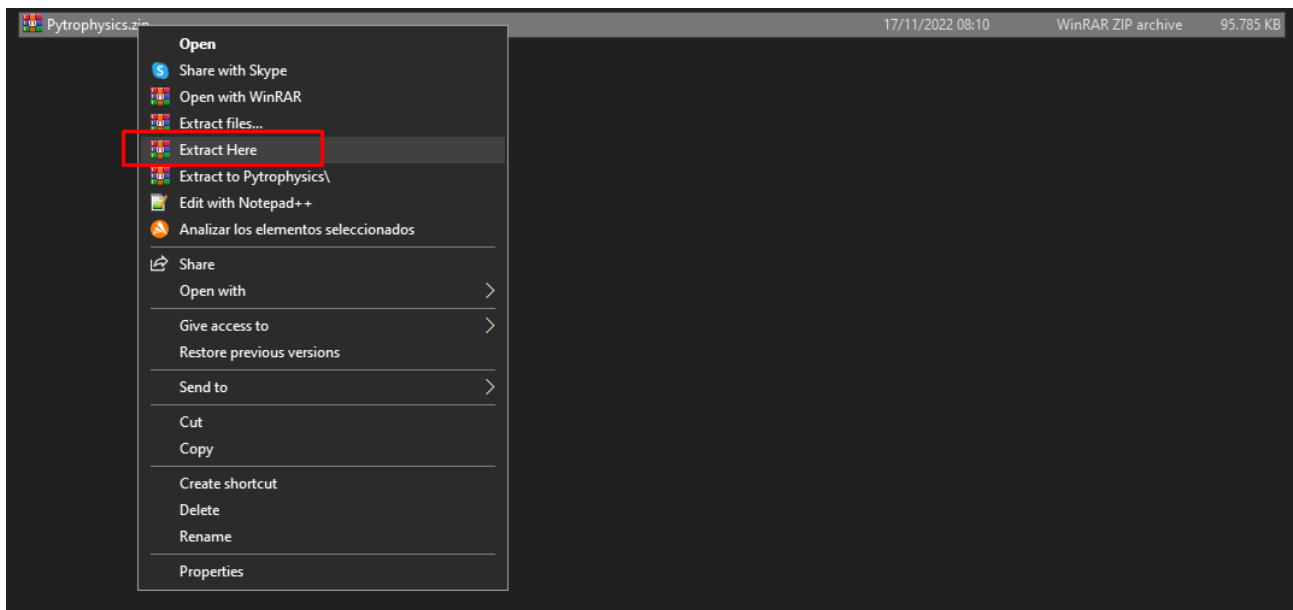


Fig. F.1: opción de descompresión con Winrar.

No se requieren pasos adicionales para instalar la aplicación. Puede moverse la carpeta resultante a otra ubicación si resultara más cómodo.

Dentro de la carpeta extraída se encuentra el archivo ejecutable Pytrophysics.exe, que permite abrir el programa haciendo doble clic.

opengl32sw.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	20.150 KB
pyexpat.pyd	29/10/2022 18:28	PYD File	194 KB
python3.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	64 KB
python310.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	4.389 KB
Pytrophysics.exe	14/11/2022 15:12	Application	9.406 KB
qpdf28.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	6.932 KB
Qt6Core.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	5.512 KB
Qt6Gui.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	7.377 KB
Qt6OpenGL.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	1.886 KB
Qt6OpenGLWidgets.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	55 KB
Qt6Svg.dll	29/10/2022 18:28	Application exten...	353 KB

Fig. F.2: nombre del archivo ejecutable.

Como la aplicación no tiene un certificado digital de una empresa (por haber sido hecho por particulares), es normal que los antivirus puedan llegar a sospechar de ella **la primera vez** (solamente) que se ejecuta la aplicación.

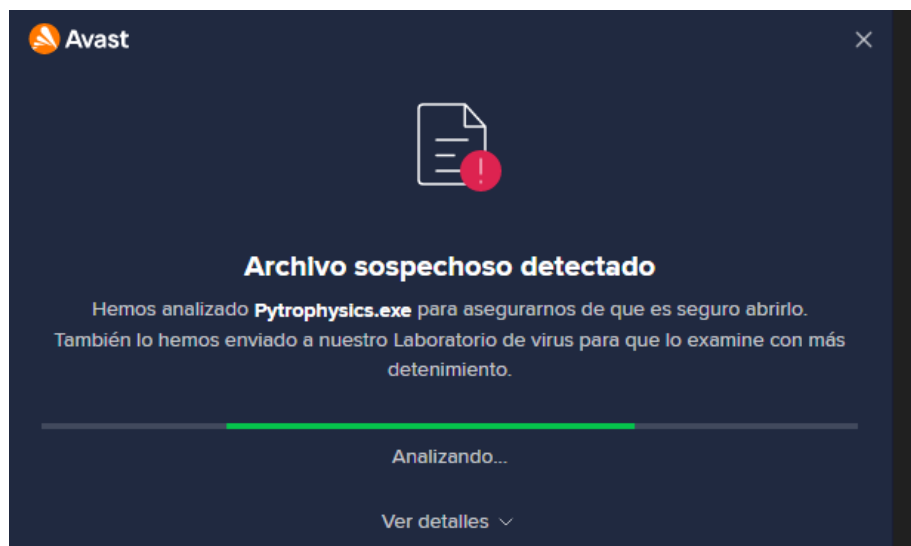


Fig. F.3: ejemplo de un cartel de sospecha de antivirus.

Rápidamente, se detectará el falso positivo y a partir de entonces la aplicación podrá abrirse **sin** esta interrupción.

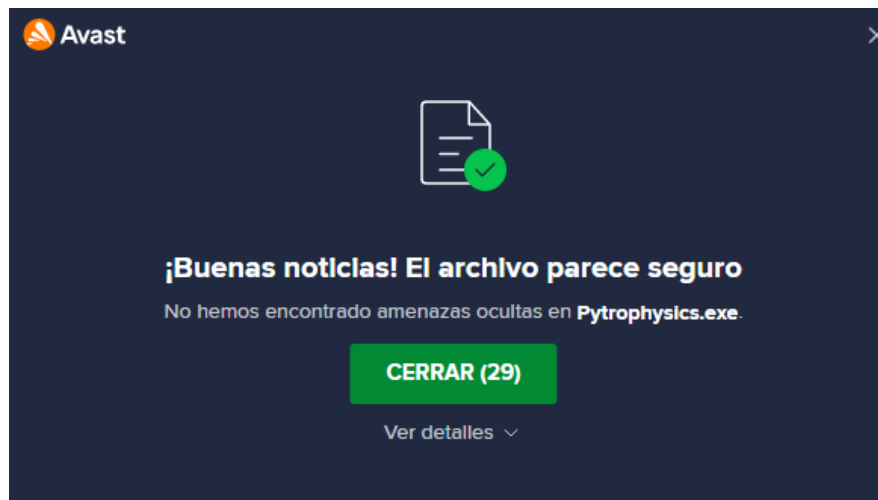


Fig. F.4: ejemplo de confirmación de falso positivo del antivirus.

Al hacer clic se abrirá la interfaz de usuario.

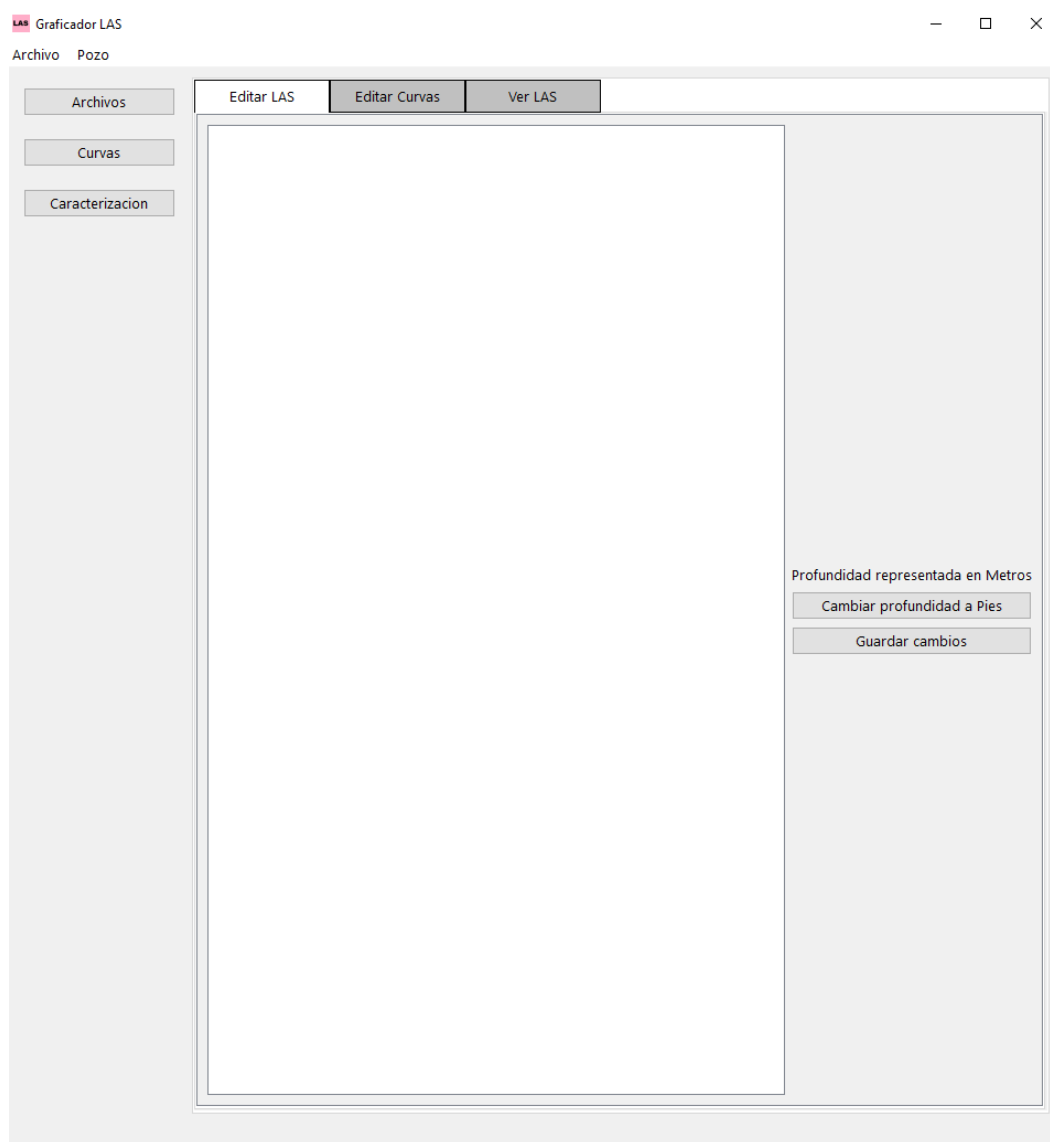


Fig. F.5: interfaz principal de la aplicación.

También puede ejecutarse buscando la aplicación por su nombre en el buscador de Windows.

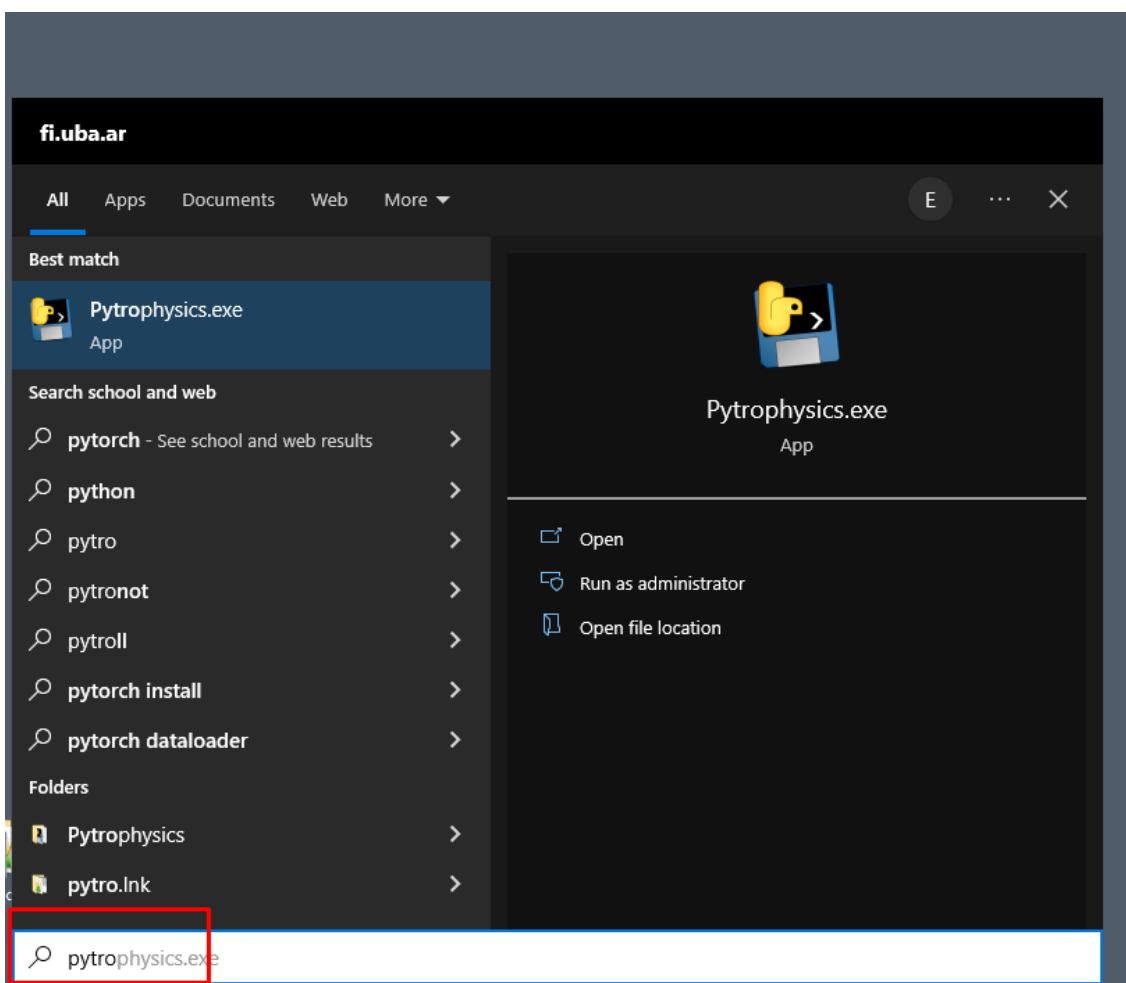


Fig. F.6: ejemplo de búsqueda de la aplicación por el nombre.

A2. Manejo de pozos

A2.1. Crear un pozo

Una vez abierto el programa, se puede crear un pozo y (por ejemplo) importar un archivo LAS para empezar el análisis. Haciendo clic en la opción "Pozo" y luego "Nuevo", se podrá elegir el nombre que se le quiere dar al pozo.

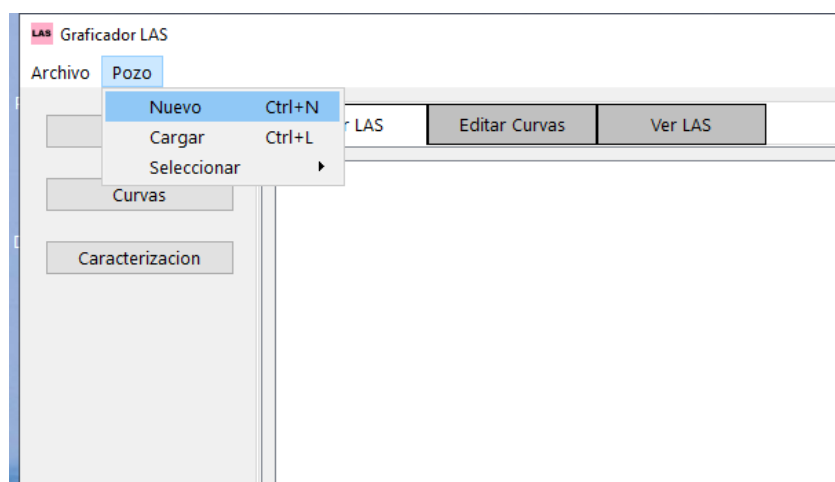


Fig. F.7: opción de crear pozo.

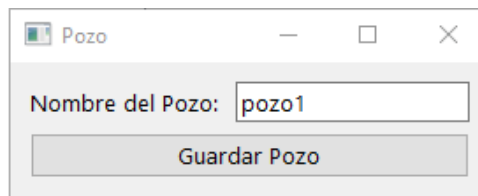


Fig. F.8: cartel para elegir el nombre del pozo.

Se puede navegar en el directorio de Windows para elegir la ubicación y el nombre del archivo LAS que tendrá el pozo. Este contendrá toda la información de curvas de profundidad que se agregué al pozo de aquí en adelante. Es decir, la información de cada archivo LAS (o TXT o CSV) que se agregue al pozo se agregará al archivo LAS creado inicialmente, sin afectar al archivo con la información original, pudiéndolo utilizar en futuras importaciones.

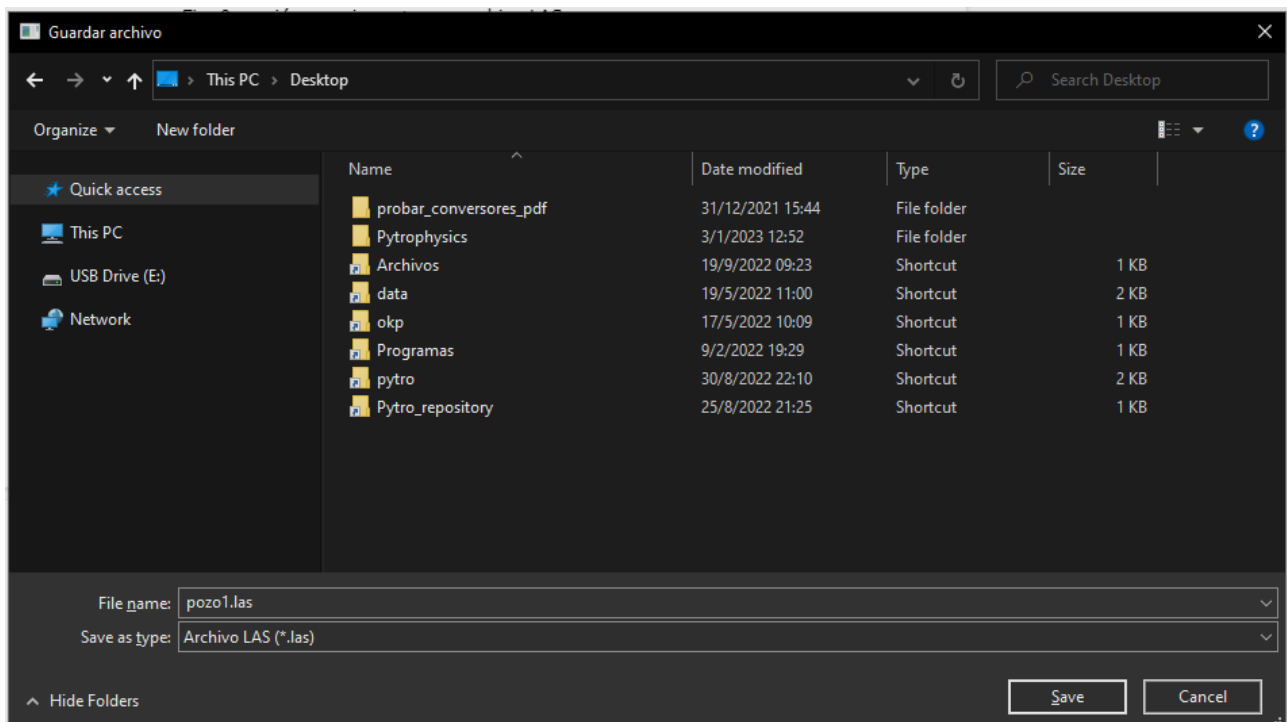


Fig. F.9: ejemplo del guardado del pozo.

Luego de la creación, podrá verse una carpeta creada en la ubicación elegida con el nombre del pozo.

A2.2. Agregar información al pozo

Ya habiendo creado el pozo (o habiendo cargado uno previamente creado, ver A2.3), se le puede agregar información, por ejemplo, con la opción "Archivo", "Agregar LAS".

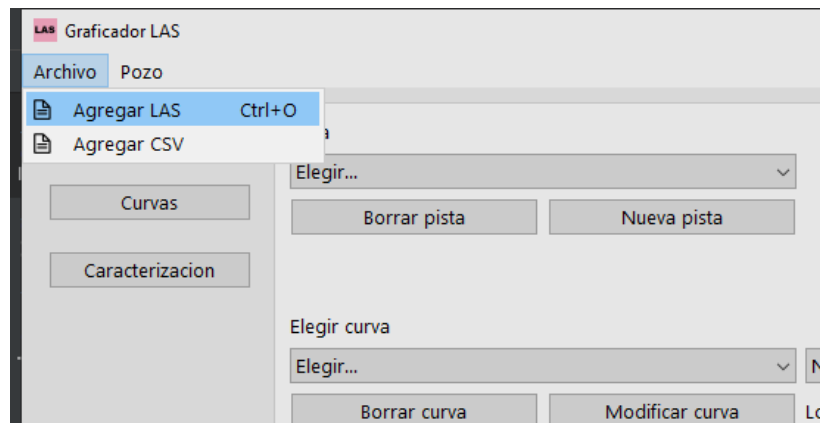


Fig. F.10: opción para agregar información de curvas a través de un archivo LAS.

Luego de elegir el archivo a importar, se agrega la información respectiva al archivo LAS del pozo. En consecuencia, todos los selectores de curvas de la aplicación permitirán elegir entre todas las curvas que fueron agregadas.

A2.3. Cargar un pozo previamente creado

En la opción "Pozo" y "Cargar", se podrá levantar un pozo previamente creado.

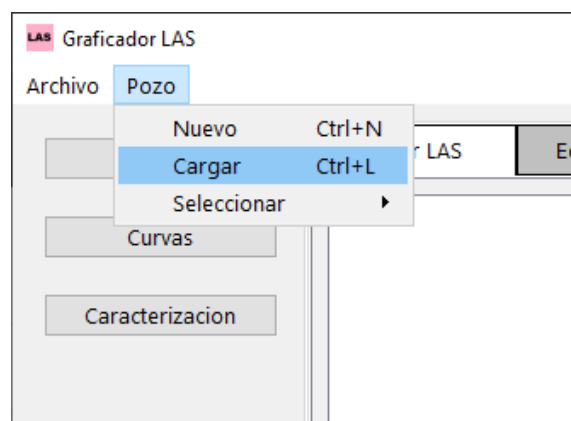


Fig. F.11: ejemplo de archivo elegido.

Para abrir un determinado pozo, buscar su carpeta y elegir su archivo LAS respectivo.

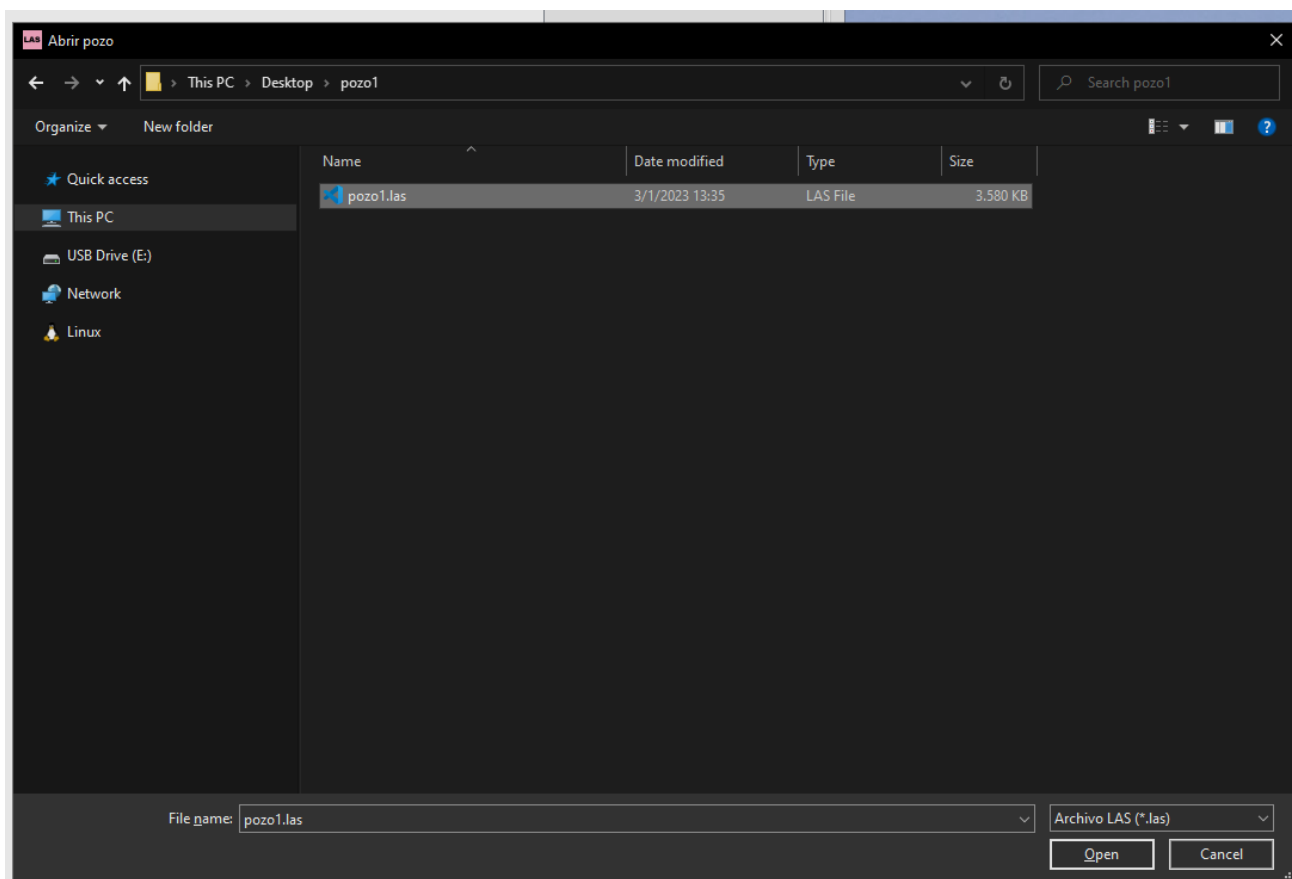


Fig. F.12: selección del archivo LAS del pozo para poder cargarlo.

Luego de cargar el archivo, en la sección "Archivos", en la pestaña "Editar LAS", se puede visualizar la información del archivo cargado.

	Editar LAS	Editar Curvas	Ver LAS		
	AHT10	AHT20	AHT30	AHT60	AH' ^
795.3	5.688	5.854	6.333	8.486	6.206
795.45	5.688	5.854	6.333	8.486	6.206
795.6	5.688	5.854	6.333	8.486	6.206
795.75	5.688	5.854	6.333	8.486	6.206
795.9	5.688	5.854	6.333	8.486	6.206
796.05	5.688	5.855	6.334	8.493	6.209
796.2	5.686	5.858	6.334	8.516	6.219
796.35	5.684	5.863	6.336	8.552	6.235
796.5	5.681	5.869	6.337	8.605	6.26
796.65	5.677	5.878	6.34	8.679	6.295
796.8	5.673	5.891	6.344	8.778	6.343
796.95	5.669	5.907	6.351	8.902	6.404
797.1	5.665	5.926	6.359	9.047	6.481
797.25	5.655	5.945	6.369	9.214	6.573
797.4	5.643	5.965	6.383	9.398	6.685
797.55	5.628	5.985	6.397	9.599	6.818
797.7	5.606	6.002	6.408	9.808	6.971
797.85	5.593	6.025	6.402	9.996	7.134
798.0	5.568	6.046	6.366	10.083	7.269
798.15	5.525	6.054	6.285	9.987	7.329
798.3	5.498	6.075	6.174	9.659	7.277
798.45	5.438	6.069	6.049	9.172	7.131
798.6	5.26	5.961	5.96	8.597	6.912
798.75	5.174	5.823	5.943	8.13	6.737
798.9	5.159	5.83	6.062	7.881	6.699
799.05	5.023	5.745	6.486	7.615	6.602
799.2	4.901	5.451	6.862	8.201	7.181
799.35	5.342	6.089	6.795	7.136	6.474

Fig. F.13: información del pozo cargado.

En el menú de "pozo" aparece como seleccionado el que fue cargado.

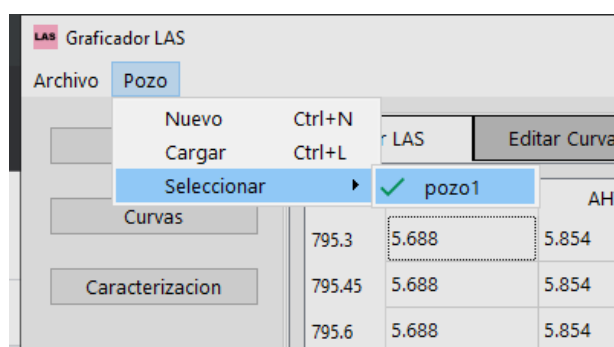


Fig. F.14: pozo seleccionado.

A3. Manejo de información de las curvas

En la sección "Archivos", existen tres pestañas con información básica del pozo. La primera, "Editar LAS", brinda una matriz para la edición individual de los registros del pozo, además de un conjunto de funcionalidades básicas que pueden resultar útiles al abrir por primera vez la aplicación. El botón de "guardar cambios" (Fig. F.15) permite persistir las modificaciones individuales de los registros, mientras que el botón encima de este último permite intercambiar la unidad de medida de la profundidad entre "metros" y "pies". Ese cambio no solo se persiste como parte de la información guardada del pozo, sino que se puede apreciar en las visualizaciones de curvas de profundidad (Fig. F.16).

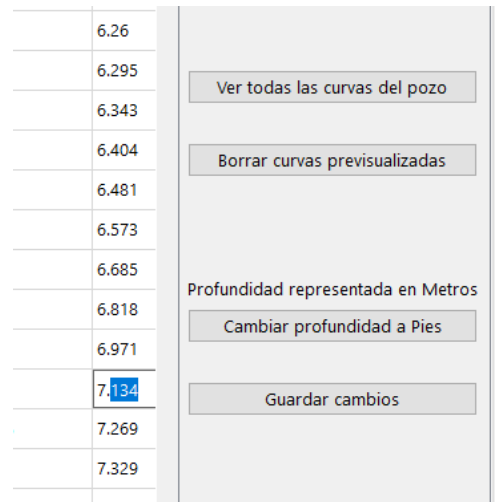


Fig. F.15: opciones de la pestaña "Editar LAS".

El botón de "ver todas las curvas del pozo" grafica todos los registros guardados y el botón "borra curvas previsualizadas" permite eliminar esta previsualización rápidamente. Es posible también visualizar curvas de profundidad en forma individual bajo distintas configuraciones(ver sección A5).

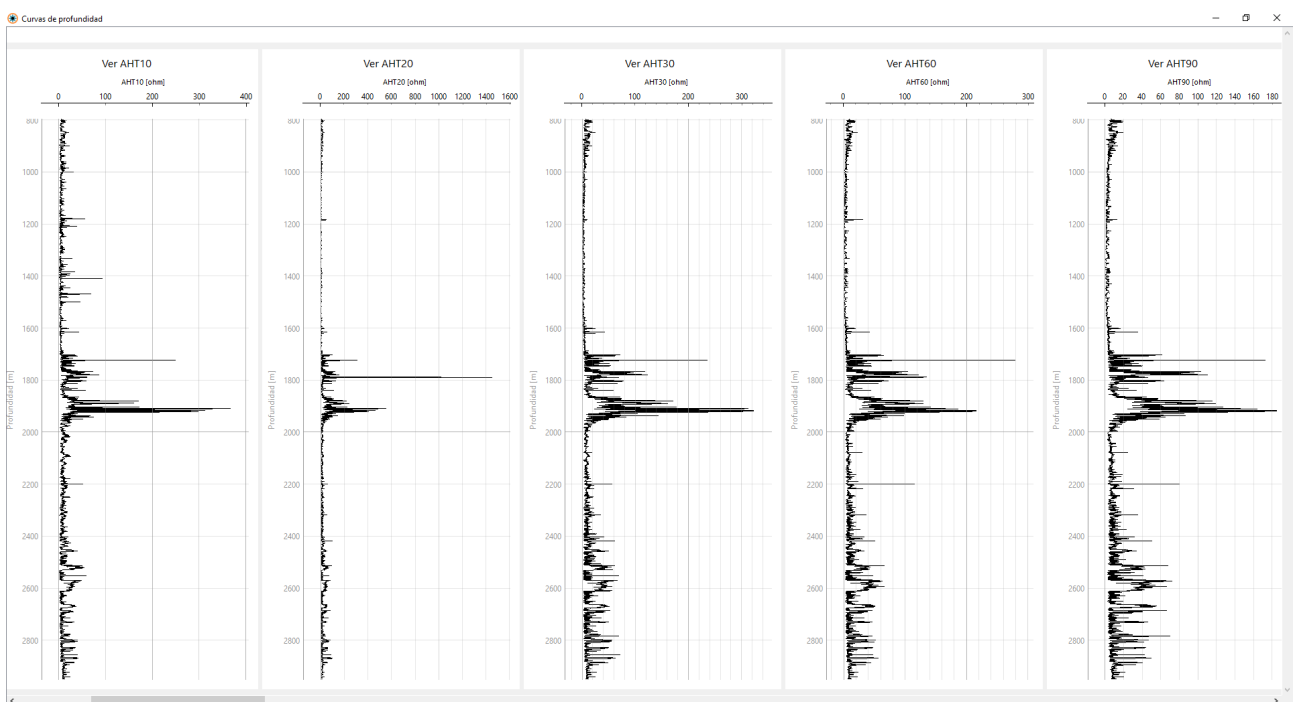


Fig. F.16: ejemplo de una visualización rápida de las curvas del pozo. En pantalla completa entran 5 pistas verticales, pero el usuario puede desplazarse a través de la ventana con la barra de *scroll* inferior.

La próxima pestaña, "Editar curvas" brinda opciones para la modificación directa del archivo LAS donde se almacena toda la información de curvas de profundidad del pozo. Las primeras opciones que aparecen

son las de creación y borrado de curvas. La aplicación permite crear una curva a partir de un valor constante (que puede ser nulo), borrar una curva existente o construir una curva a partir de la combinación de las dos siguientes, donde la segunda curva ingresada se utiliza para llenar los nulos de la primera.

Agregar Curva

Nombre Curva:

Valor (Numerico): ☐ Llenar de Nulos

Agregar Curva

Borrar Curva

Nombre Curva: ☒ Confirmar borrado manualmente

Borrar Curva

Combinar Curvas

Para cada paso de profundidad toma el valor de curva 1, o en caso de que este sea nulo toma el valor de curva 2

Nombre Curva 1:

Nombre Curva 2:

Nombre: ☐ Borrar Curvas Originales

Combinar Curvas

Fig. F.17: opciones de creación o borrado de curvas en la sección de "Editar curvas".

Las últimas dos opciones de la pestaña son para la modificación de curvas existentes. Se permite reemplazar en una o en todas las curvas un determinado valor numérico o nulo, ya sea en la totalidad del archivo o en una sección de profundidad determinada. A su vez, se permite crear una nueva curva donde los nulos son interpolados por valores conocidos.

Reemplazar Valores

Nombre Curva: ☐ Reemplazar en todas las curvas

Valor 1 (Numerico): ☐ Nulos

Valor 2 (Numerico): ☐ Nulos

Profundidad

☒ Todo el LAS

☐ personalizado

Profundidad mín.:

Profundidad máx.:

Reemplazar valor 1 por valor 2

Interpolador valores nulos

☒ Crear nueva curva interpolando nulos

☐ Reemplazar curva original interpolando nulos

☐ Reemplazar todas las curvas originales interpolando nulos

Curva original:

Nuevo nombre:

Interpolador valores nulos

Fig. F.18: opciones de modificaciones de curvas en la sección de "Editar curvas".

La última pestaña de la sección de "Editar curvas" simplemente sirve para la visualización directa de la información del pozo. Se puede obtener un resultado similar abriendo el archivo *LAS* que contiene la información del pozo con algún editor de texto.

Editar LAS		Editar Curvas	Ver LAS
AHT90	.ohm : DeepRes	6	
BIT	.inch : BitSize	7	
CALI	.in : Caliper		
DT4P	.us/f : Sonic	9	
DT4S	.us/f : ShearSonic	10	
KKCORE	. : 13		
GR	.gAPI : GammaRay	11	
NPHI	.m3/m : Neutron	14	
PEFZ	.B/E : PEF	15	
PHIE	.DEC : Phi	17	
BVW	.DEC : BVW	8	
PHICOREDS	.dec : CorePhi		
RHOZ	.g/cm : Density	18	
SP	.mV : SP	21	
SPBL	.mV : SP	22	
SW	.DEC : Sw	24	
SWCOREDS	. :		
VCL	.dec : Vcl	25	
RHO_M_CALC	. :		
POROSIDAD	. :		
PHIE_CALC	. :		
GR_1	. :		
K_ADA	.mD :		
TEMP_CALC	.C :		
RW_CALC	.ohm m :		
SW_CALC	. :		
PERMEABILIDAD_CALC.mD	. :		
SWIRR_CALC	. :		
VSHALE_CALC	. :		
--Params -----			
--Other -----			
--ASCII -----			
795.30000	5.68800	5.85400	6.33300 8.48600 6.20600 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 79.22000
795.45000	5.68800	5.85400	6.33300 8.48600 6.20600 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 72.80100
795.60000	5.68800	5.85400	6.33300 8.48600 6.20600 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 67.48100
795.75000	5.68800	5.85400	6.33300 8.48600 6.20600 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 66.91800
795.90000	5.68800	5.85400	6.33300 8.48600 6.20600 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 71.47400
796.05000	5.68800	5.85500	6.33400 8.49300 6.20900 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 83.55400
796.20000	5.68600	5.85800	6.33400 8.51600 6.21900 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 103.23000
796.35000	5.68400	5.86300	6.33600 8.55200 6.23500 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 124.39700
796.50000	5.68100	5.86900	6.33700 8.60500 6.26000 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 134.39800
796.65000	5.67700	5.87800	6.34000 8.67900 6.29500 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 132.63800
796.80000	5.67300	5.89100	6.34400 8.77800 6.34300 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 129.13700
796.95000	5.66900	5.90700	6.35100 8.90200 6.40400 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 127.47100
797.10000	5.66500	5.92600	6.35900 9.04700 6.48100 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 130.47600
797.25000	5.65500	5.94500	6.36900 9.21400 6.57300 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 134.79400
797.40000	5.64300	5.96500	6.38300 9.39800 6.68500 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 136.18800
797.55000	5.62800	5.98500	6.39700 9.59900 6.81800 8.50000 -999.0 -999.0 -999.0 131.83300

Fig. F.19: visualización directa de la información cargada al pozo en la aplicación.

A4. Caracterización

A continuación se comentan los distintos modelos utilizados para calcular las distintas variables de interés en el análisis del pozo. Cuando corresponda, se especifican las fórmulas matemáticas utilizadas en cada uno de los mencionados cálculos. En cuanto a las unidades de medida, excepto que se indique lo contrario en la explicación de la funcionalidad o que el programa indique algo diferente, se utilizan las siguientes:

- Densidad o ρ : g / cm^3
- Temperatura: $^{\circ}C$
- Sónico compresional o Δt : $\mu s / ft$
- Factor fotoeléctrico o PEF: $VARNS / e$

A modo de comentario, todas las variables adimensionales (como *Vshale* y porosidad, o " ϕ ") están expresadas en fracción (y no en porcentaje), excepto que se indique lo contrario.

A4.1. Vshale

En la sección "Caracterización", en la pestaña "Vshale", se ven distintas pestañas correspondientes a diferentes formas de calcular la arcillosidad. Por ejemplo, en la pestaña "GR", se puede calcular la

arcillosidad definiendo la curva de "GR" respectiva, el intervalo donde se quiere realizar el cálculo, los valores de *clean* y *shale* y el tipo de correlación.

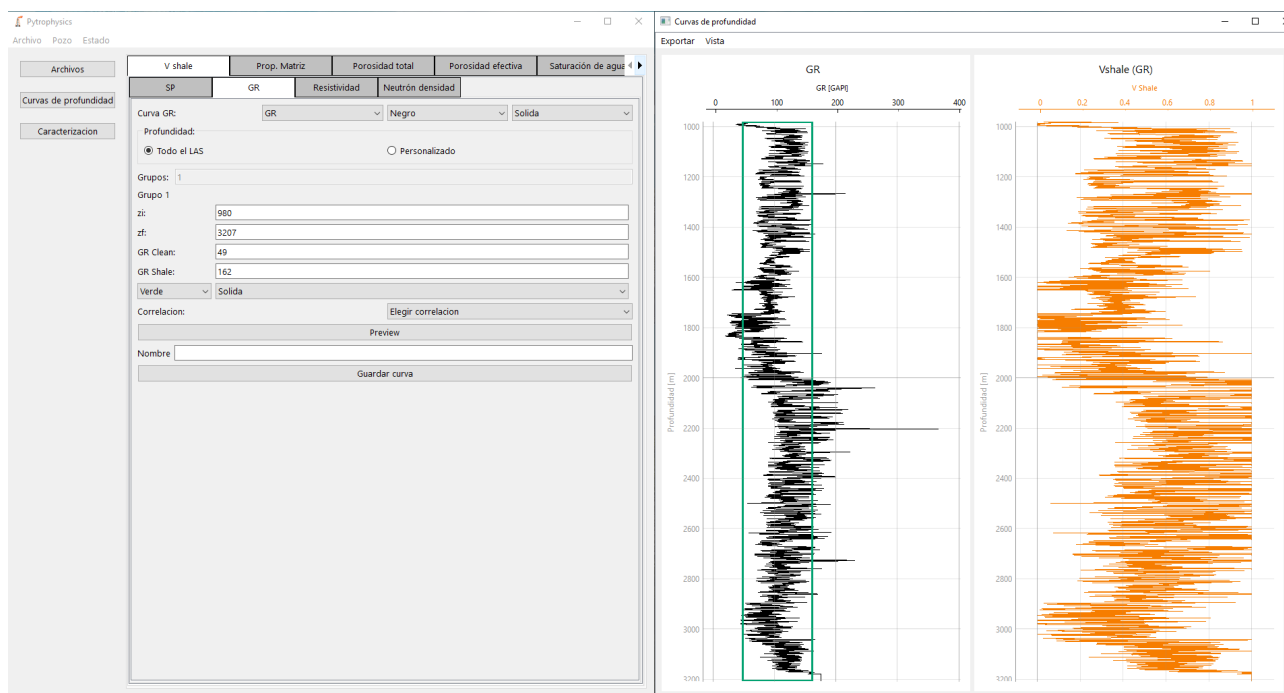


Fig. F.20: ejemplo del cálculo de VShale con el método de GR.

Nota: todas las curvas de profundidad (es decir, aquellas donde el eje vertical es la profundidad del pozo) se grafican sobre una misma ventana y pueden modificarse (ver A5). Al hacer *zoom* con la rueda del *mouse* sobre cualquiera de las pistas (secciones verticales) que contienen las curvas de profundidad, se ampliará el detalle sobre el eje vertical y el acercamiento o alejamiento será solidario en todas las pistas.

En caso de que se quiera realizar varios cálculos con distintos intervalos de profundidad, puede aumentarse la cantidad de grupos y definir múltiples casos de *clean* y *shale*.

Fig. F.21: usando múltiples grupos en el cálculo de VShale.

Como en el resto de los casos, puede guardarse el resultado del cálculo (en este caso, "Vshale") como una curva del pozo, asignándole un nombre.

La fórmula utilizada para el cálculo de V_{shale} a través del método GR depende de la correlación utilizada. Partiendo de [A.1]:

$$I_{shale} = \left(\frac{GR_{log} - GR_{clean}}{GR_{shale} - GR_{clean}} \right)$$

donde:

- GR_{shale} es el valor más alto de la curva GR ingresada;
- GR_{log} es un valor de la curva GR ingresada (cada uno de los que se evalúa punto a punto);
- GR_{clean} es el valor más bajo de la curva GR ingresada.

se puede hallar el valor de volúmen de arcilla a partir de diferentes correlaciones:

- Lineal [A.1]

$$V_{shale} = I_{shale}$$

- Larionov para rocas del terciario [A.2]

$$V_{shale} = 0.083(2^{3.7I_{shale}-1})$$

- Larionov para rocas anteriores al terciario [A.2]

$$V_{shale} = 0.33(2^{2I_{shale}-1})$$

- Steiber [A.3]

$$V_{shale} = \frac{I_{shale}}{3-2.I_{shale}}$$

- Clavier-Hoyle-Meunier [A.4]

$$V_{shale} = 1.7 - \left\{ 3.38 - (I_{shale} + 0.7)^2 \right\}^{0.5}$$

Otras formas de calcular el V_{shale} disponibles en otras pestañas son:

- SP [A.1]

$$V_{shale} = \left(\frac{SP_{clean} - SP_{log}}{SP_{clean} - SP_{shale}} \right)$$

donde:

- SP_{clean} es el valor más bajo de la curva SP ingresada;
- SP_{log} es un valor de la curva SP ingresada (cada uno de los que se evalúa punto a punto);
- SP_{shale} es el valor más alto de la curva SP ingresada.

- Resistividad [A.5]

$$V_{shale} = \left(\frac{\text{Log}(R_t) - \text{Log}(R_{max})}{\text{Log}(R_{shale}) - \text{Log}(R_{max})} \right)$$

donde:

- R_{clean} es el valor más alto de la curva de resistividad ingresada;
- R_t es un valor de la curva de resistividad ingresada (cada uno de los que se evalúa punto a punto);
- R_{shale} es el valor más bajo de la curva de resistividad ingresada.

• Neutrón densidad [A.1]

$$V_{shale} = \left(\frac{\phi_{neutron} - \phi_{densidad}}{\phi_{neutron-shale} - \phi_{densidad-shale}} \right)$$

donde:

- $\phi_{neutron}$ es un valor de la curva ingresada como neutrón.
- $\phi_{densidad}$ es un valor de la curva ingresada como densidad.
- $\phi_{neutron-shale}$ es el valor más alto de la curva ingresada como neutrón.
- $\phi_{densidad-shale}$ es el valor más alto de la curva ingresada como densidad.

A4.2. Litologías

La aplicación tiene un *solver* de mineralogía, donde se pueden ingresar litologías que se asume que existen en la formación con el objetivo de aproximar cuál es la presencia (en fracción) de cada una de ellas conforme varía la profundidad. La única litología obligatoria es la de arcillosidad (V_{shale}) y se pueden especificar hasta ocho litologías. La sección inferior a la selección de litologías que tiene *checkboxes* es para definir condiciones especiales: en el caso de que el valor de carbón esté habilitado, su litología correspondiente será la única que aparezca en el gráfico en los casos donde la curva de porosidad ingresada sea menor al valor de carbón; en el caso de que el valor de anhidrita esté habilitado, su litología correspondiente será la única que aparezca en los casos donde la curva de porosidad sea mayor al valor especificado. Como salidas adicionales a las fracciones de litologías encontradas de forma iterativa, se tienen las curvas de porosidad (" ϕ "), densidad (" ρ " o " RHO ") y tiempo de tránsito (" ΔT ").

Pytophysics

Archivo Pozo Estado Ayuda

Archivos

Curvas de profundidad

Caracterización

V shale Prop. Matriz Porosidad total Porosidad efectiva Saturación de agua

Litologías Editor de litologías

Perfiles

Densidad (p) RHOZ

Sónico (Δt) DT4P

PEF PEFZ

Neutrón NPHI

Vshale VSH_SP_CALC Litología Vshale

Litologías

Arenisca Dolomita

Caliza N/A

N/A N/A

N/A N/A

Densidad dsh [g/cm3] 2.78

☐ Densidad carbón [g/cm3] 1.27 N/A

☐ Densidad anhidrita [g/cm3] 2.98 N/A

Profundidad

☒ Todo el LAS

☐ Personalizado

Profundidad máx.:

Profundidad mín.:

Previsualizar

Nombre de curva

Guardar porosidad

Nombre de curva

Vshale

Guardar litología

Nombre de curva

Fig. F.22: menú del solver de minerologías.

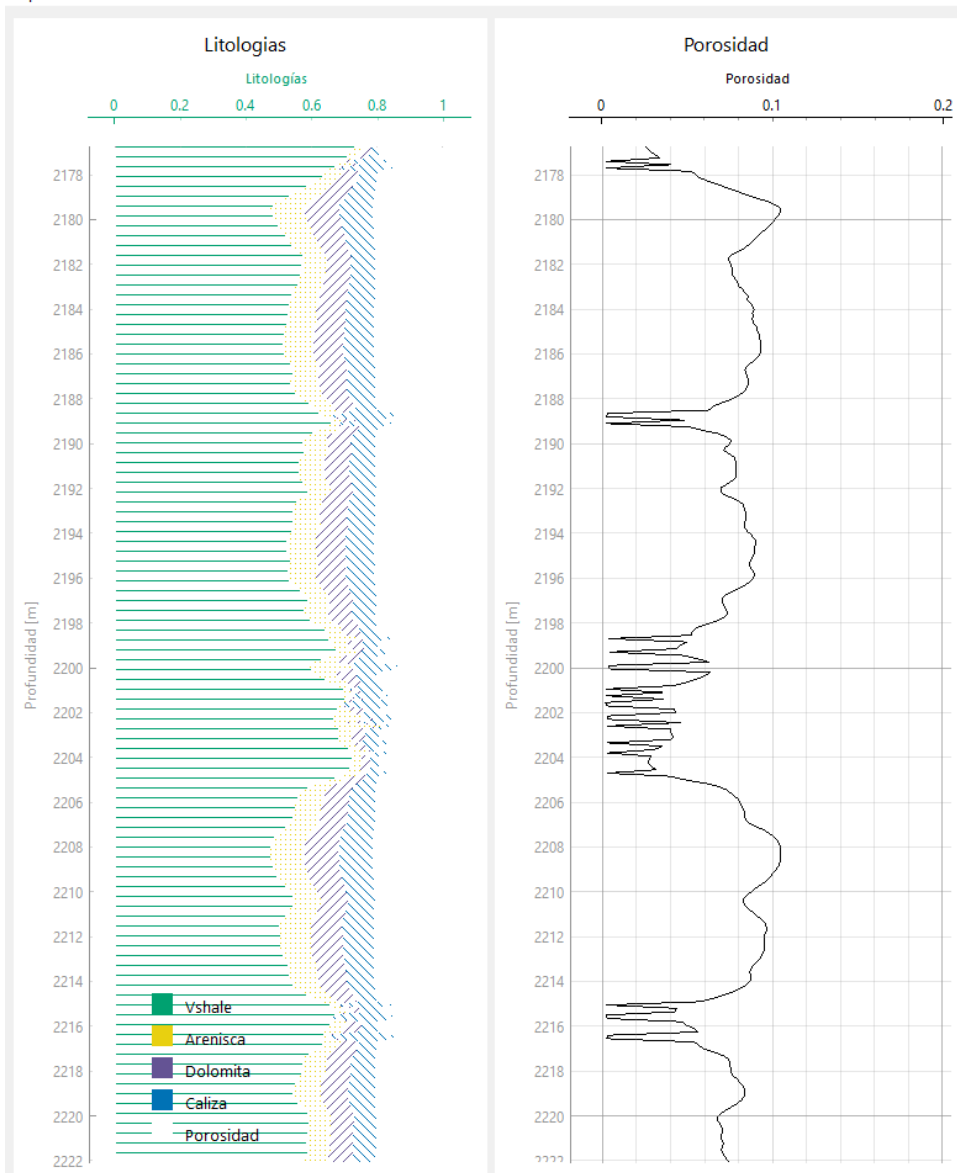


Fig. F.23: ejemplo de visualización de las litologías.

Existe la posibilidad de agregar litologías propias. Luego de cada cambio en esta pantalla (agregar una litología, modificar un valor existente o borrar una litología), se debe tocar el botón de guardado. Toda la información de litologías del pozo se guarda en el archivo *litologias.json* dentro de la carpeta del pozo.

Nombre	Densidad (ρ) [g/cm3]	Sónico (Δt) [μs/ft]	PEF [VARNs/e]	Neutrón [%]	En fracción
Arenisca	2.65	55	1.81	-4	<input type="checkbox"/>
Amarillo		Puntos			<input type="button" value="Borrar"/>
Caliza	2.71	47.5	5.08	0	<input type="checkbox"/>
Azul		Diagonal derecha			<input type="button" value="Borrar"/>
Vshale	2.6	64.5	5.08	1.6	<input type="checkbox"/>
Verde		Línea horizontal			<input type="button" value="Borrar"/>
Dolomita	2.87	43	3.14	4	<input type="checkbox"/>
Violeta		Diagonal izquierda			<input type="button" value="Borrar"/>
Anhidrita	2.98	50	5.06	1	<input type="checkbox"/>
Rosa		Enrejado fino			<input type="button" value="Borrar"/>

Fig. F.24: menú para agregar litologías.

A4.3. Porosidad total

Todos los métodos para el cálculo de la porosidad total son algebraicos y se muestran a continuación.

- Densidad [A.1]

$$\phi_D = \left(\frac{\rho_{matriz} - \rho_{log}}{\rho_{matriz} - \rho_{fluido}} \right)$$

donde:

- ρ_{fluido} es un valor de la curva ingresada como tal;
- ρ_{matriz} es el valor de RHO obtenido anteriormente.

- Asquith Gibson [A.6]

$$\left\{ \begin{array}{ll} (0.5\phi_D + 0.5\phi_N) & si \quad \phi_D < \phi_N \\ \sqrt{0.5\phi_D^2 + 0.5\phi_N^2} & si \quad \phi_D > \phi_N \end{array} \right.$$

donde:

- ϕ_D es el valor de la densidad calculada por el método de neutrón anteriormente;
- ϕ_N es el valor de la porosidad calculada por el método de neutrón anteriormente.

- Wyllie [A.7]

$$\phi_D = \frac{\Delta t_{matriz} - \Delta t_{log}}{(\Delta t_{matriz} - \Delta t_{fluido})B_{cp}}$$

donde:

- Δt_{matriz} es el valor de DTCO obtenido anteriormente;
- Δt_{log} es el valor de la curva ingresada como tal;
- Δt_{fluido} es la constante ingresada por tal;
- ΔB_{cp} es la constante ingresada como tal.

- Gardner-Hunt-Raymer [A.8]

$$\phi_S = \left(\frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{matriz}}{\Delta t_{log}} \frac{5}{8} \right)$$

donde:

- Δt_{matriz} es el valor de DTCO obtenido anteriormente;
- Δt_{log} es el valor de la curva ingresada como tal.

Para los métodos en donde existe la posibilidad de ingresar un valor constante en vez de la curva, el mismo se utiliza como función constante para el cálculo, ignorando lo especificado en el selector de curvas correspondiente. La curva seleccionada solo se considera si no se explicita un valor constante en los campos correspondientes que lo permitan.

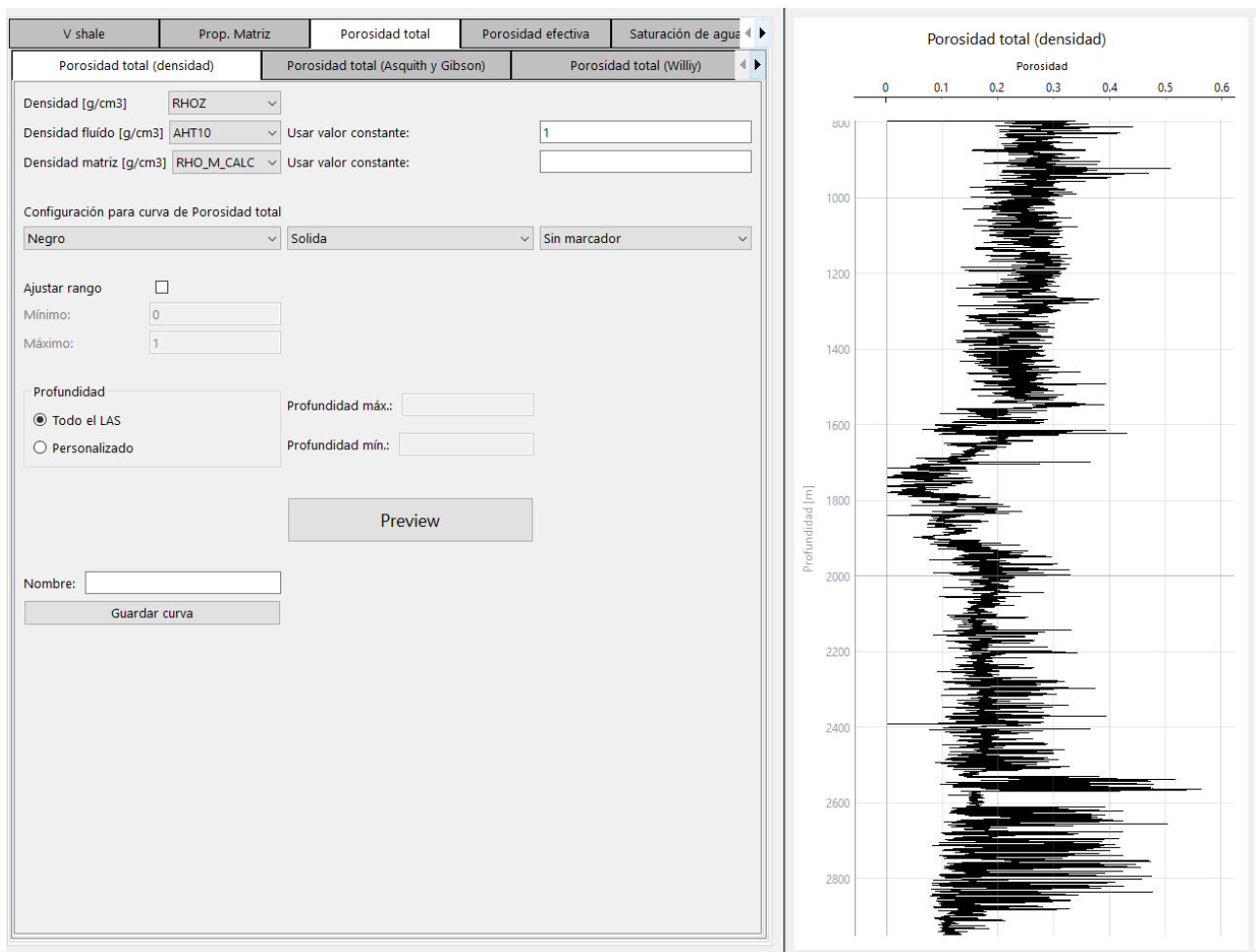


Fig. F.25: ejemplo de cálculo de porosidad total, a través del método de densidad. Notar que el valor de densidad fluido se especifica en 1, a falta de una curva (asumiendo que dicho fluido es el agua).

Para los distintos cálculos de porosidad total, existe la posibilidad de ajustar el rango de valores que la curva puede tomar. En caso de que el cálculo algebraico para una determinada profundidad sea menor a la cota inferior especificada, o mayor a la cota superior, el mismo es reemplazado por el valor correspondiente para respetar los límites indicados por el usuario.

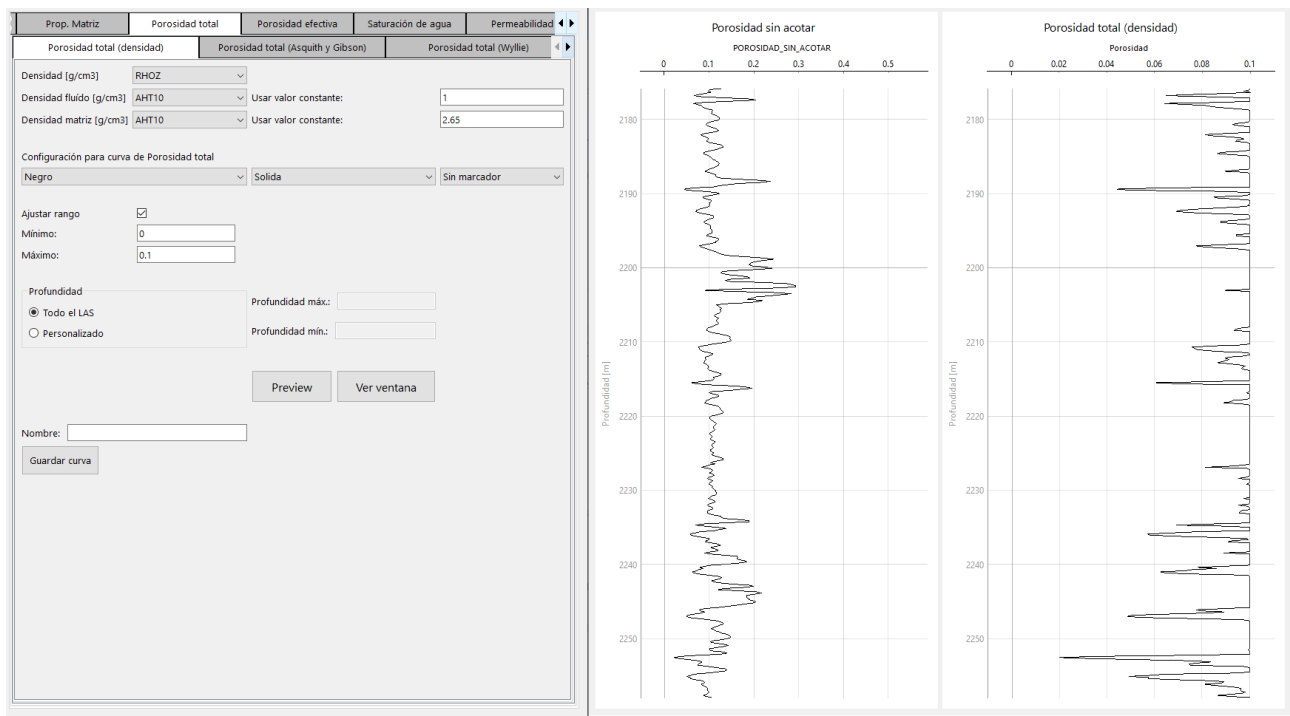


Fig. F.26: comparación de la porosidad total sin ajuste de rango (izquierda) y con un ajuste de rango entre 0 y 1 (derecha). La pista de la izquierda fue generada en blanco y luego se agregó la curva de porosidad total guardada sin restricción de rango (ver A5 para información sobre la creación de pistas propias).

A4.4. Porosidad efectiva

El cálculo de porosidad efectiva se reduce a [A.1]:

$$\phi_e = \phi \cdot (1 - V_{shale})$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (sónico compresional, densidad, etc.);
- V_{shale} es el valor de la curva de vshale calculada anteriormente.

La pantalla no tiene ningún componente diferente a la de porosidad total, reduciéndose al mencionado cálculo algebraico.

Pytophysics

Archivo Pozo Estado Ayuda

Archivos

Curvas de profundidad

Caracterización

V shale Prop. Matriz Porosidad total Porosidad efectiva Saturación de agua

Porosidad POROSIDAD

Vshale VSH_SP

Configuración para curva de Porosidad efectiva

Negro Solida Sin marcador

Ajustar cotas

Mínimo: 0

Máximo: 1

Profundidad

☒ Todo el LAS
 ☐ Personalizado

Profundidad máx.:

Profundidad mín.:

Preview

Nombre:

Guardar curva

Fig. F.27: menú para el cálculo de porosidad.

A4.5. Saturación de agua

Para el cálculo de la misma se parte del cómputo de la curva de temperatura.

Fig. F.28: pantalla para el cálculo de la temperatura.

Lo esperable es obtener una recta con pendiente negativa, ya que al aumentar la cercanía al núcleo terrestre (la profundidad), es razonable que la temperatura aumente. Se puede optar por utilizar una curva de temperatura, o bien, por realizar su cálculo en forma indirecta. Para esto, además de especificar la unidad de la temperatura, puede optarse por ingresar el valor de gradiente geotérmico directamente, o calcularlo a partir de un valor de temperatura ambiente:

$$T = GG (Z - Z_{BHT}) + BHT$$

donde:

- $GG = \frac{(BHT - T_{AMB})}{Z_{bht}}$ es el gradiente geotérmico;

- BHT es la temperatura del fondo del pozo ingresada;

- T_{AMB} es la temperatura ambiente ingresada;

- Z es la curva de profundidad del pozo;
- Z_{BHT} es la temperatura del fondo del pozo ingresada.

Teniendo el valor de la temperatura, se puede calcular el valor de la resistividad del agua, o "RW". Para este caso, un valor de temperatura de referencia que puede ser útil es el valor "BHT" especificado anteriormente.

Fig. F.29: pantalla para el cálculo de la resistividad del agua.

El mismo está dado por la fórmula empírica de Arphs [A.9]:

$$RW = \frac{rwc * (tc + k)}{T + k}$$

donde:

- rwc es la resistividad del agua de referencia;
- tc es la temperatura de referencia;
- k es una constante de proporcionalidad, cuyo valor es 21,5 si se usa la escala Celsius y 6,77 si se usa la escala Fahrenheit;

- T es la curva de temperatura ingresada.

A partir de los dos cálculos anteriores, puede pasarse a la pestaña de "Sw" para el cálculo de la saturación de agua propiamente dicho. En el mismo, se tiene un menú que muestra las opciones asociadas a cada uno de los métodos que permiten este cálculo.

Fig. F.30: pantalla para el cálculo de la saturación de agua.

Se especifican a continuación los modelos utilizados en la aplicación para el cálculo de la saturación de agua.

- Archie [A.10]

$$S_w = \left(\frac{a R_w}{\phi^m R_t} \right)^{1/n}$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;

- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2;
- n es una constante, que por defecto vale 2.

• Dual Water [A.11]

$$\frac{1}{R_t} + \frac{\phi_t^{m^*} \cdot S_w^n}{a} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{S_{wb}}{S_w} \left(\frac{1}{R_{wb}} - \frac{1}{R_w} \right) \right) = 0$$

donde:

- $m^* = m + C_m (0.258 Y + 0.2 (1 - e^{-16.4 Y}))$
- $Y = Q_v \cdot \phi_t / (1 - \phi_t)$
- $S_{wb} = 1 - \frac{\phi_e}{\phi_t}$
- $Q_v = a / \phi_t + b$
- R_{wb} es una constante ingresada;
- C_m es una constante, que por defecto vale 1;
- a y b son constantes ingresadas por el usuario;
- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;
- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2;
- n es una constante, que por defecto vale 2.

• Simandoux [A.12]

$$S_w = \frac{a \cdot R_w}{2 \cdot \phi^m} \left[\sqrt{\left(\frac{V_{shale}}{R_{shale}} \right)^2 + \frac{4 \phi^m}{a \cdot R_w \cdot R_t}} - \frac{V_{shale}}{R_{shale}} \right]$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;
- V_{shale} es el valor de la curva de v_{shale} calculada anteriormente;
- R_{shale} es una constante ingresada por el usuario;

- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2.
- Simandoux modificada [A.13]

$$S_w^n \cdot \left(\frac{\phi^m}{a \cdot R_w} \right) + S_w \cdot \left(\frac{V_{shale}}{R_{shale}} \right) - \frac{1}{R_t} = 0$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;
- V_{shale} es el valor de la curva de vshale calculada anteriormente;
- R_{shale} es una constante ingresada por el usuario;
- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2;
- n es una constante, que por defecto vale 2.

- Indonesia [A.14]

$$S_w = \left\{ \frac{\sqrt{\frac{1}{R_t}}}{\left(\frac{V_{shale}^{(1-0.5 \cdot V_{shale})}}{\sqrt{R_{shale}}} \right) + \sqrt{\frac{\phi_e^m}{a \cdot R_w}}} \right\}^{(2/n)}$$

- ϕ es la porosidad efectiva;
- V_{shale} es el valor de la curva de vshale calculada anteriormente;
- R_{shale} es una constante ingresada por el usuario;
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;
- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2;
- n es una constante, que por defecto vale 2.

- Ferti [A.15]

$$S_w = \phi_e^{-m/2} \cdot \left\{ \sqrt{\frac{a \cdot R_w}{R_t} + \left(\frac{\alpha \cdot V_{shale}}{2} \right)^2} - \left(\frac{\alpha \cdot V_{shale}}{2} \right) \right\}$$

- ϕ es la porosidad efectiva;
- V_{shale} es el valor de la curva de vshale calculada anteriormente;
- R_w es la resistividad del agua, que debe calcularse como parte de esta pantalla;
- R_t es una curva de resistividad en profundidad, ingresada por el usuario;
- α es una constante, que por defecto vale 1;
- a es una constante, que por defecto vale 1;
- m es una constante, que por defecto vale 2.

En cuanto a la saturación de gas (SG) y de petróleo (SO), la pantalla restante simplemente realiza un cálculo recíproco respecto de la curva de saturación de agua ingresada (es decir, devuelve "uno menos la curva").

Fig. F.31: pantalla para el cálculo de la saturación de gas y petróleo.

A4.6. Permeabilidad

Existen cuatro métodos analíticos para obtener permeabilidad, que se corresponden con pestañas de la sección homónima en el programa.

- Tixier [A.16]

$$k = \left(250 \cdot \phi^3 \cdot \frac{1}{S_{wirr}} \right)^2$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- S_{wirr} es la curva de S_{wirr} .

- Coates [A.17]

$$k = \left(100 \cdot \phi^2 \cdot \frac{(1 - S_{wirr})}{S_{wirr}} \right)^2$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- S_{wirr} es la curva de S_{wirr} .

- Timur [A.18]

$$k = C \cdot \frac{(100 \phi)^{4.4}}{(100 S_{wirr})^2}$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- S_{wirr} es la curva de S_{wirr} ;
- C es una constante empírica de proporcionalidad, por defecto tomada en 0,136.

- Coates y Dumanoir [A.17]

$$k = \left(C \cdot \phi^{2 \cdot W} \cdot \frac{1}{W^4} \cdot \frac{R_{tirr}}{R_w} \cdot (0.077 + 1.55 \cdot \rho_h - 0.627 \cdot \rho_h^2) \right)^2$$

donde:

- ϕ es alguna de las porosidades calculadas anteriormente (Sónico compresional, densidad, etc.);
- R_{tirr} es la resistividad cuando la muestra está con saturación de agua irreducible;
- R_w es la resistividad del agua ingresada.

$$W^2 = (3.75 - \phi) + \frac{1}{2} \cdot \left(\log_{10} \left(\left(\frac{R_w}{R_{tirr}} \right) \cdot \frac{1}{0.077 + 1.55 \cdot \rho_h - 0.627 \cdot \rho_h^2} \right) + 2.2 \right)^2$$

donde:

$$C = 23 + 465 \cdot \rho_h - 188 \cdot \rho_h^2$$

- ρ_h es la resistividad cuando la muestra está saturada con hidrocarburo.

The screenshot shows the Pytrophysics software window. The top menu bar includes 'Archivo', 'Pozo', 'Estado', and 'Ayuda'. Below the menu is a toolbar with buttons for 'Archivos', 'Curvas de profundidad', and 'Caracterización'. The main interface has a tabbed structure. The active tab is 'Permeabilidad', which contains sub-tabs for 'Random Forest', 'XGboost', 'Decision Tree con Ada', 'K PHI', and 'Tixier'. The 'Tixier' sub-tab is selected. The main panel for the Tixier method includes the following controls:

- 'Porosidad Efectiva' dropdown menu set to 'PHIE'.
- 'Swirr' dropdown menu set to 'SWIRR_CALC'.
- 'Constante de proporcionalidad' text input field containing '1000'.
- 'Configuración para curva de Tixier' section with three dropdown menus: 'Negro', 'Solida', and 'Sin marcador'.
- 'Ver en escala logarítmica' checkbox, which is unchecked.
- 'Profundidad' section with two radio buttons: 'Todo el LAS' (selected) and 'Personalizado'.
- 'Profundidad máx.' and 'Profundidad mín.' text input fields.
- 'Preview' and 'Ver ventana' buttons.
- 'Nombre:' text input field.
- 'Guardar curva' button.

Fig. F.32: pantalla para el cálculo de la permeabilidad a través de Tixier.

A su vez, debido a la dependencia entre el cálculo del *Swirr* y la permeabilidad (ver 3.8), existe la posibilidad de utilizar distintos modelos de *machine learning* para la interpolación de la curva de permeabilidad a partir de un conjunto reducido de valores discretos.

Si bien para limitar la complejidad en el manejo de la aplicación se acotaron las posibilidades de ajuste al utilizar los modelos de *machine learning*, sí existe la posibilidad de elegir entre el uso de hiperparámetros "por defecto", el ajuste manual de algunos de los hiperparámetros del modelo y la búsqueda automatizada de hiperparámetros, la cual es dentro de rangos acotados para no aumentar considerablemente el tiempo de espera del usuario. La decisión de no dar la posibilidad de configurar estos rangos para limitar la complejidad en el manejo de la aplicación también va en concordancia a la simplificación pedida para la interfaz de usuario final.

El primer modelo de *machine learning* con el cual se pueden interpolar los valores discretos de permeabilidad es Random Forest [A.19]. Para las tareas de predicciones tabulares, no es el modelo que mejor se desempeña en el caso general, pero puede ser útil como *baseline* para tener una referencia a mejorar en el uso de modelos que se comporten mejor. Al igual que en el resto de las pestañas de modelos de *machine learning*, se le da la posibilidad al usuario de elegir qué curvas serán utilizadas como *features* para el entrenamiento del modelo y la consecuente predicción.

Archivo Pozo Estado Ayuda

Archivos

Curvas de profundidad

Caracterización

Prop. Matriz Porosidad total Porosidad efectiva Saturación de agua Permeabilidad

Random Forest XGboost Decision Tree con Ada K PHI Toxier

Curva de valores core

KKCORE

Features a utilizar

AHT10, AHT20, AHT30, AHT60, AHT90, ...

Usar hiperparámetros por defecto ☒ Elegir hiperparámetros ☐ Buscar hiperparámetros ☐

max_depth de árbol min_samples_split Estimadores min_weight min_samples_leaf

100 0.01 50 0.0 1

Mostrar valores para comparar ☒

KKCORE

Configuración para curva de Random Forest

Negro Solida Sin marcador

Ver en escala logarítmica ☐

Profundidad

☒ Todo el LAS ☐ Personalizado

Profundidad máx.: Profundidad mín.:

Preview Ver ventana

Nombre:

Guardar curva

Fig. F.33: pantalla para la predicción de permeabilidad utilizando Random Forest.

Además de la curva resultante, en las pantallas de predicciones se obtiene como resultado un *scatterplot* que muestra la relación en escala logarítmica entre la predicción y los valores reales para el caso de los registros cuyo valor de permeabilidad era conocido.

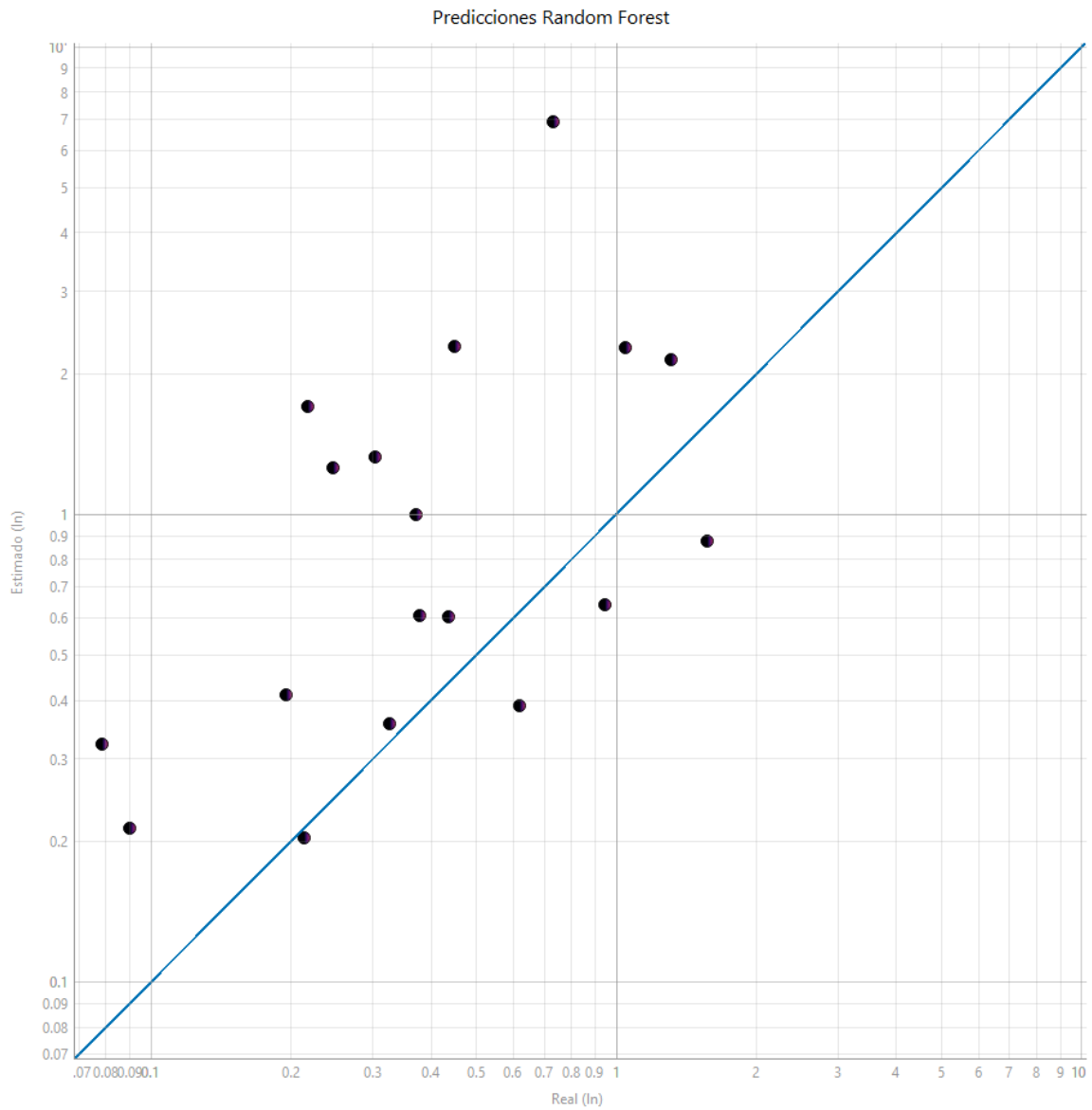


Fig. F.34: ejemplo de *scatterplot* que muestra la relación entre predicciones y valores reales en escala logarítmica.

Pasando a la siguiente pestaña, XGBoost [A.20] tiene un desempeño que sería esperable que fuera mejor, no solo para esta tarea en particular sino para los problemas de regresión tabulares en general. En cuanto a la interfaz de usuario, se diferencia de la anterior en cuanto a que los hiperparámetros son diferentes, pero las posibilidades que brinda la pestaña son las mismas.

Archivos
Curvas de profundidad
Caracterización

Permeabilidad
Swirr (Timur)
Parametros de corte
Crossplot
Histogramas

Random Forest
XGboost
Decision Tree con Ada
K PHI
Tixier

Curva de valores core
KKCORE

Features a utilizar
AHT20, AHT30, DT4P, PHICOREDS

Usar hiperparámetros por defecto ☒
Elegir hiperparámetros ☐
Buscar hiperparámetros ☐

max_depth de árbol
4

Gamma
5.0

Estimadores
500

Learning rate
0.4

min_child_weight
1.0

Mostrar valores para comparar ☒
KKCORE

Configuración para curva de XGboost
Negro
Solida
Sin marcador

Ver en escala logarítmica ☐

Profundidad
☒ Todo el LAS
☐ Personalizado

Profundidad máx.:
Profundidad mín.:

Preview
Ver ventana

Nombre:
Guardar curva

Fig. F.35: pantalla para la predicción de permeabilidad utilizando XGBoost.

El siguiente y último modelo es AdaBoosting [A-21], utilizando Decision Trees [A-22] como estimador. Nuevamente, la diferenciación en este caso se da en los hiperparámetros a utilizar, y de acuerdo a lo comentado sobre la simplificación de la interfaz, el estimador utilizado es fijo.

Fig. F.36: pantalla para la predicción de la permeabilidad utilizando AdaBoost.

A4.7. K PHI

Esta pantalla tiene dos salidas: una curva dependiente de la profundidad y un *scatterplot* para dar una línea de tendencia entre los valores discretos de permeabilidad de laboratorio y los análogos valores discretos de porosidad.

En cuanto a la curva, la misma se obtiene como:

$$e^{b+\log(\phi_e) \cdot m}$$

donde:

- ϕ_e es la porosidad efectiva;
- m es la pendiente de la recta obtenida por ajuste de cuadrados mínimos de los valores discretos de permeabilidad y porosidad;
- b es la ordenada al origen obtenida por ajuste de cuadrados mínimos de los valores discretos de permeabilidad y porosidad.

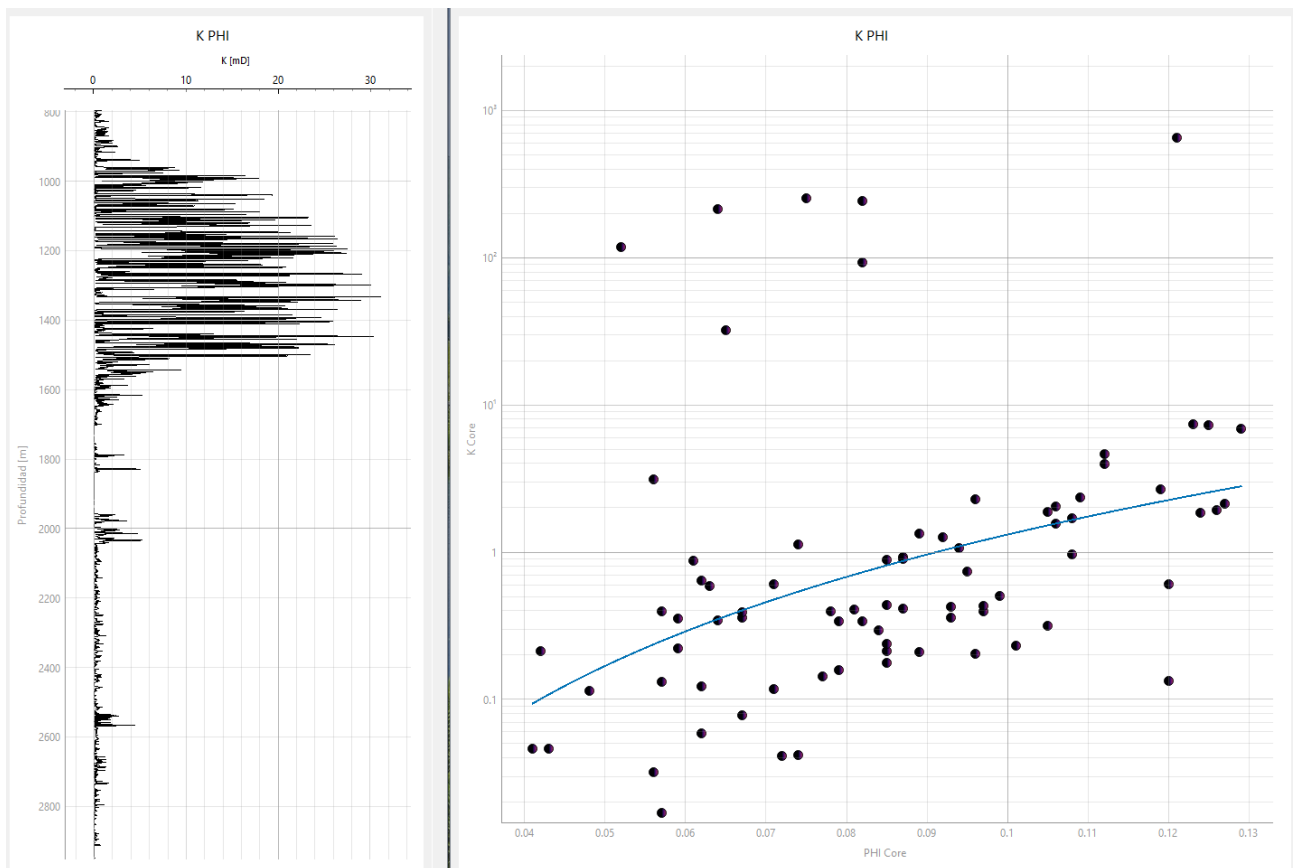


Fig. F.37: ejemplo de las salidas de la pantalla de K PHI.

A4.8. Swirr

El cálculo de saturación de agua irreducible se logra a través del método de Timur [A.18]:

$$S_{swirr} = \left(c \phi^{4.5} \frac{1}{k} \right)^{1/2}$$

donde:

- K es la curva de permeabilidad;
- ϕ es la curva de porosidad;
- c es una constante de proporcionalidad.

Al igual que en la pestaña de *Vshale*, el *Swirr* puede calcularse por grupos, cada uno con su constante de proporcionalidad.

Pytophysics

Archivo Pozo Estado Ayuda

Archivos

Curvas de profundidad

Caracterizacion

Porosidad efectiva Saturación de agua Permeabilidad Swirr (Timur) Parametros de corte

Porosidad: RHOZ

Permeabilidad: PERMEABILIDAD_CALC

Configuración para curva de Swirr (Timur)

Negro Solida Sin marcador

Profundidad

☐ Todo el LAS

☒ Personalizado

Grupos: 2

Grupo 1

zi: 1000

zf: 2000

Constante de proporcionalidad: 0.000001

Grupo 2

zi: 2000

zf: 25000

Constante de proporcionalidad: 0.000002

Preview Ver ventana

Nombre: SWIRR_CALC

Guardar curva

Fig. F.38: pantalla para el cálculo de Swirr.

Adicionalmente, la saturación de agua irreducible puede calcularse a través del método de Buckles (ver A4.16).

A4.9. Parámetros de Corte

Los parámetros de corte (o gráficos de cutoff) se utilizan para determinar el valor en el que el resto de los valores de una curva que alcanzan o quedan por debajo (o por encima) representan un porcentaje específico del total de los valores de la curva. Al indicar un determinado porcentaje, se puede obtener el valor del parámetro de corte y viceversa.

En el caso del *cutoff* C1, el mismo se asocia a la curva de *Vshale*. Un valor común es buscar un parámetro de corte que esté por debajo del 30% de la curva acumulada y ordenada de menor a mayor:

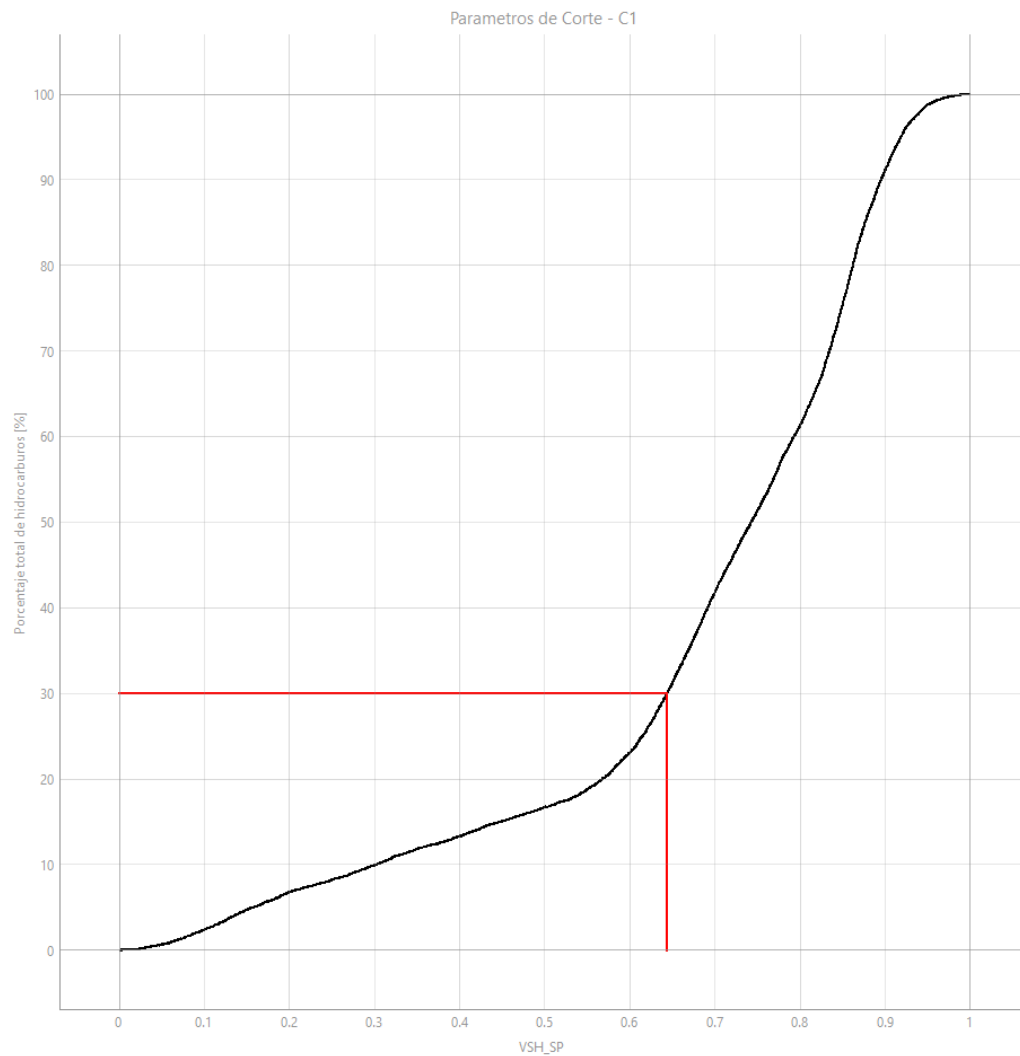


Fig. F.39: ejemplo de gráfico de parámetro de corte C1 para Vshale.

En cuanto a la pantalla de C2, relacionada a la búsqueda de un valor de corte para la porosidad efectiva, se puede utilizar el valor de *cutoff* obtenido en la pantalla C1, en caso de que se tilde la opción de "Tomar Cutoff C1". Para el caso de la porosidad efectiva, es común utilizar buscar un valor por debajo de 0.6 (60%, con la curva decreciente).

C1	C2	C3	C4	Espesores
<div>Variable de entrada (Porosidad Efectiva Φ_e) AHT10</div> <div> <div> Profundidad <input checked="" type="radio"/> Todo el LAS <input type="radio"/> personalizado </div> <div> Profundidad mín.: <input type="text"/> Profundidad máx.: <input type="text"/> </div> </div> <div> Color y Tipo de Línea: Negro Sólida </div> <div> Acumulado <input type="radio"/> Creciente <input checked="" type="radio"/> Decreciente </div> <div> Rango de valores <input type="radio"/> Valores por debajo del Cutoff <input checked="" type="radio"/> Valores por encima del Cutoff </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Tomar Cutoff C1 </div> <div> <div>C1</div> <div>Variable de Entrada (VShale) VSH_SP</div> <div>Cutoff: <input type="text" value="0.6435"/></div> <div> Rango de valores <input checked="" type="radio"/> Valores por debajo del Cutoff <input type="radio"/> Valores por encima del Cutoff </div> </div> <div> Cutoff <input type="radio"/> Valor de Cutoff: <input type="text" value="4.728"/> <input checked="" type="radio"/> Relación neto a total: <input type="text" value="60"/> </div> <div> Aclaración: La palabra 'nan' es una palabra reservada para identificar un valor nulo en caso de no lograr una solución con los parámetros ingresados </div> <div> <div>Preview</div> <div>Ver ventana</div> </div> <div> Nombre: <input type="text"/> </div> <div> <div>Guardar curva</div> </div>				

Fig. F.40: ejemplo cálculo de C2, reutilizando el valor de cutoff C1.

Lo análogo se puede hacer en las pantallas de C3 y C4, siempre trayendo los valores de corte de la pantalla anterior a la nueva. Como un detalle adicional, la pantalla de C3 cuenta con un visualizador especial de valores de *cutoff* para el caso de la curva de saturación de agua, aunque dicha funcionalidad puede usarse para tener una referencia gráfica del valor de cualquier curva si es que esto fuera de utilidad.

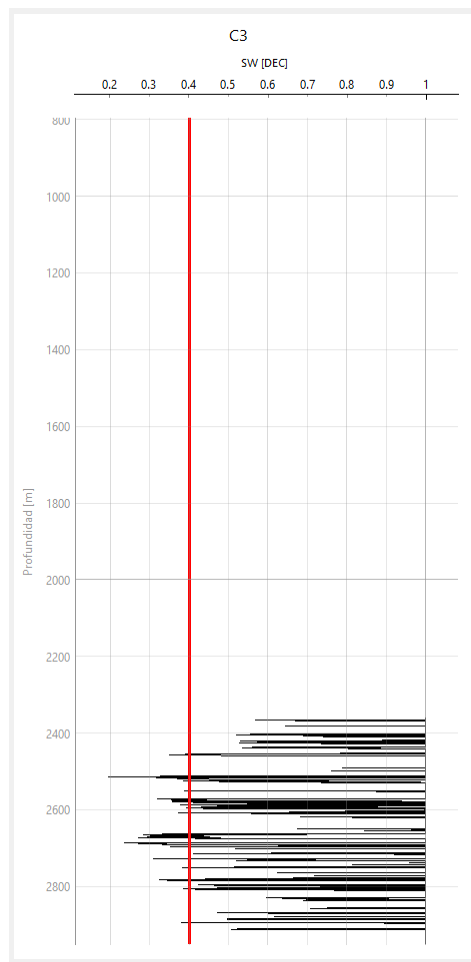


Fig. F.41: ejemplo de referencia gráfica para el valor de cutoff C3.

A4.10. Gráfico de espesores

Las curvas asociadas a los *cutoff* anteriores pueden utilizarse para representar gráficamente las zonas más adecuadas para el punzado. Se puede tomar como ejemplo un caso genérico con valores típicos:

- para una curva calculada de arcillosidad, un valor de corte de 0,3 considerando los puntos de la curva respectiva por encima de ese valor.
- para una curva calculada de porosidad efectiva, un valor de corte de 0,08 considerando los puntos de la curva respectiva por debajo de ese valor.
- para una curva de saturación de agua, un valor de corte de 0,6 considerando los puntos de la curva respectiva por encima de ese valor.

Pytophysics

Archivo Pozo Estado Ayuda

Archivos

Curvas de profundidad

Caracterización

Swirr (Timur) Parametros de corte Crossplot Histogramas IPR

C1 C2 C3 C4 Espesores

C1

Variable de entrada VSHALE_CALC

Cutoff: 0.3

Rango de valores

☒ Valores por debajo del Cutoff ☐ Valores por encima del Cutoff

Amarillo Solida

Nombre Espesor: E1

☒ Tomar Cutoff C2

C2

Variable de Entrada POROSIDAD

Cutoff: 0.08

Rango de valores

☐ Valores por debajo del Cutoff ☒ Valores por encima del Cutoff

Azul Solida

Nombre Espesor: E2

☒ Tomar Cutoff C3

C3

Variable de Entrada SW_CALC

Cutoff: 0.6

Rango de valores

☒ Valores por debajo del Cutoff ☐ Valores por encima del Cutoff

Verde Solida

Nombre Espesor: E3

☐ Tomar Cutoff C4

C4

Variable de Entrada AHT10

Cutoff: Valor positivo

Rango de valores

Fig. F.42: ejemplo de ingresos de curvas para el cálculo de espesores.

Los gráficos de espesores muestran los intervalos de profundidad que cumplen las sucesivas condiciones de corte. En consecuencia, el último gráfico contiene las zonas que cumplen con todas las condiciones ingresadas (en el caso del ejemplo, tres). Sería esperable que las zonas con alta porosidad y baja saturación de agua fueran potencialmente productivas:

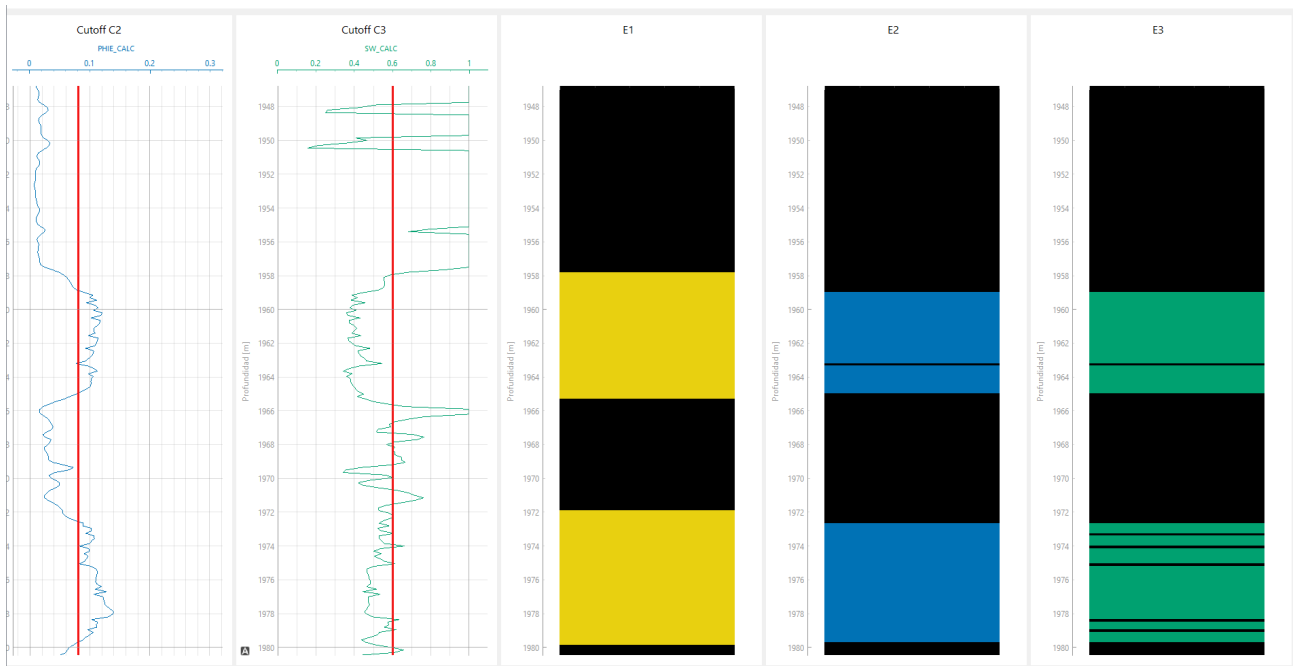


Fig. F.43: ejemplo de análisis de espesores. Las zonas coloreadas corresponden con una porosidad efectiva "alta" (por encima de la línea de *cutoff*) y una saturación de agua "baja" (por debajo del valor de corte).

A4.11. Crossplot libre

La aplicación permite realizar gráficos de dispersión o *crossplots* con curvas a elección, pudiendo superponer varias dispersiones en una misma pantalla, eligiendo cuál tiene precedencia visual sobre el resto, así como también pudiendo visualizar una tercera variable a partir de una barra lateral.

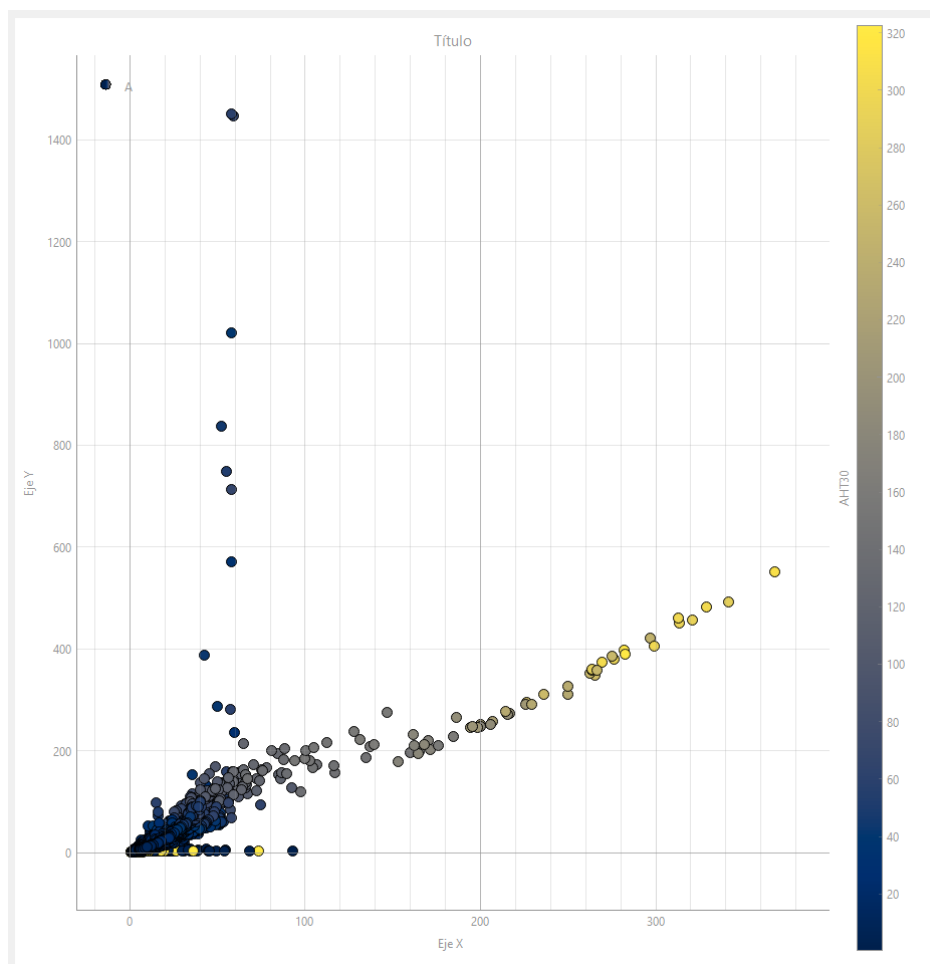


Fig. F.44: ejemplo de gráfico de dispersión con tres variables.

Nota: a diferencia de lo que ocurre con las curvas de profundidad, los diagramas de las ventanas individuales (diagramas de dispersión, histogramas y gráficos de productividad) tienen "zoom libre", es decir que al mover la rueda del *mouse*, la ampliación o contracción se hace tanto en el eje vertical como en el horizontal.

A4.12. Gráficos de propiedades de matriz

Esta funcionalidad presenta alternativas al cálculo iterativo de los valores de densidad (" ρ " o "*RHO*") y tiempo de tránsito (" ΔT "), en la medida en que permite la identificación de litologías de forma gráfica, a través de cuatro *crossplots*: "densidad-neutrón", "densidad-pef", "sónico-Neutrón" y "densidad-sónico". A diferencia de las curvas resultantes con el *solver* de mineralogía, esta sección permite el guardado de valores constantes promedio (siendo baja la oscilación de los valores de matriz " ρ " y " ΔT "). Los cuatro *crossplots* se basan en el ingreso de las curvas que les dan sus respectivos nombres para plasmar la dispersión sobre un patrón gráfico. Esto permitirá identificar distintas litologías de acuerdo al *crossplot* con el que se esté trabajando. Por ejemplo, en el *crossplot* "densidad-pef", el patrón gráfico permite la identificación de tres litologías: arena, caliza y dolomita (Fig. F.45).

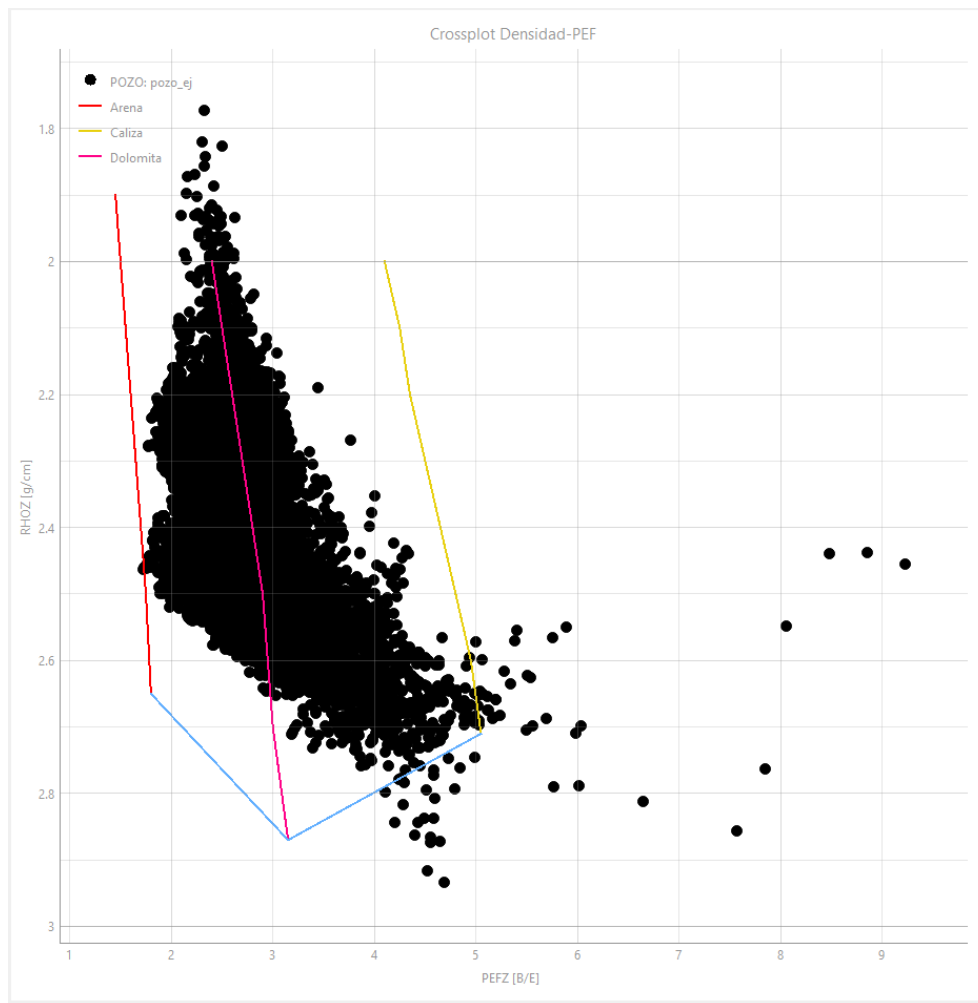


Fig. F.45: ejemplo de crossplot "densidad-pef".

Nota: en la parte superior izquierda de la imagen se puede visualizar una pequeña sección de leyendas que vincula a cada color de de las rectas del patrón gráfico con la litología que representan. En todos los gráficos donde aparezca una sección de leyendas, notar que la misma se puede desplazar "arrastrándola" con el *mouse* para que no resulte molesta al ver o hacer *zoom* en el gráfico.

A4.13. Crossplot M-N y Rhomma-Umma

El *crossplot* M-N [A-23] de la aplicación es otra alternativa para generar una dispersión que permita la identificación de litologías, teniendo al igual que los *crossplots* predecesores la posibilidad de utilizar (por ejemplo) la profundidad del pozo como "eje-z". Las salidas posibles que se pueden guardar de la pantalla se corresponden con las coordenadas "X" e "Y" del pozo, llamadas aquí M y N producto de la respectiva transformación que parte de las tres curvas de entrada: porosidad neutrón, sónico compresional y densidad. Existe la posibilidad de ingresar valores constantes en vez de una curva para cada uno de estos tres casos, haciendo que los cálculos punto a punto se realicen con una función constante del valor ingresado en vez de con un registro del pozo.

La transformación de variables se hace a partir de las siguientes ecuaciones:

$$M = \frac{189 - \Delta t}{\rho_b - 1} 0.01$$

$$N = \frac{1 - \varphi_N}{\rho_b - 1}$$

donde:

- Δt es la curva de "sónico compresional" ingresada;
- ρ_b es la curva de densidad ingresada;
- φ_N es la curva de porosidad ingresada.

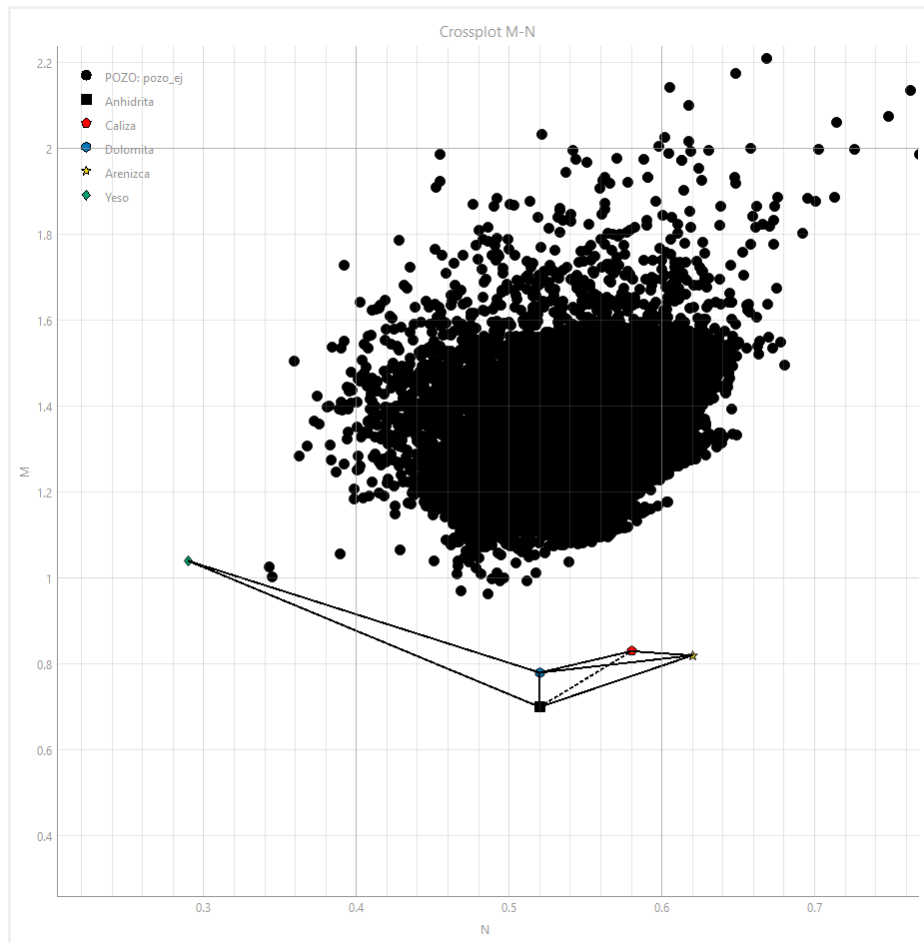


Fig. F.46: ejemplo de crossplot M-N.

En cuanto al *crossplot* Rhomma-Umma [A-23], si bien su funcionalidad es análoga al M-N, las litologías que se pueden identificar son menos: caliza, dolomita y arenisca, lo cual simplifica la figura geométrica que se utiliza como patrón gráfico para la identificación mineral.

La transformación de variables para la realización de la dispersión se hace a partir de las siguientes ecuaciones.

$$RHOMA = \frac{\rho_b - \phi_{D/N}}{1 - \phi_{D/N}}$$

$$UMAA = \frac{Pe \cdot \rho_b - \phi_{D/N} \cdot 0.36}{1 - \phi_{D/N}}$$

Donde:

- Pe es la curva de factor fotoeléctrico ingresada;
- $\phi_{D/N}$ es la curva de porosidad ingresada;
- ρ_b es la curva de densidad ingresada.

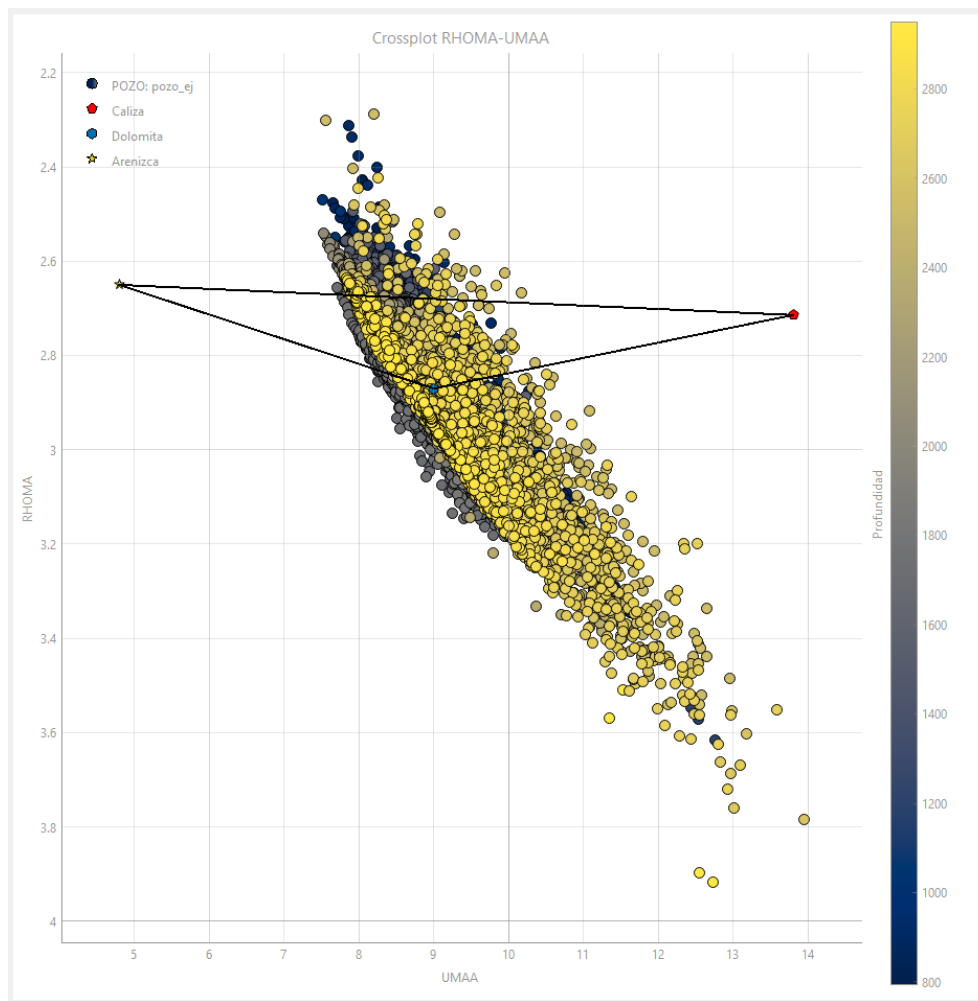


Fig. F.47: ejemplo de crossplot Rhomma-Umma.

A4.14. Identificación mineral GR espectral

A diferencia de los gráficos de dispersión anteriores para la identificación de litologías, los gráficos de identificación mineral GR espectral permiten identificar minerales de acuerdo a la presencia de valores en secciones delimitadas. El gráfico correspondiente a la primera pestaña, cuyas entradas son las curvas de torio y potasio, establece curvas para circunscribir las regiones utilizadas para identificar los minerales. Las mismas están asociadas a un valor constante resultante del cociente entre torio y potasio:

$$Th / k = c$$

donde:

- Th es la curva de torio;
- k es la curva de potasio;
- c puede tomar diferentes valores: 25; 12; 3,5; 2; 1; 0,6 y 0,3.

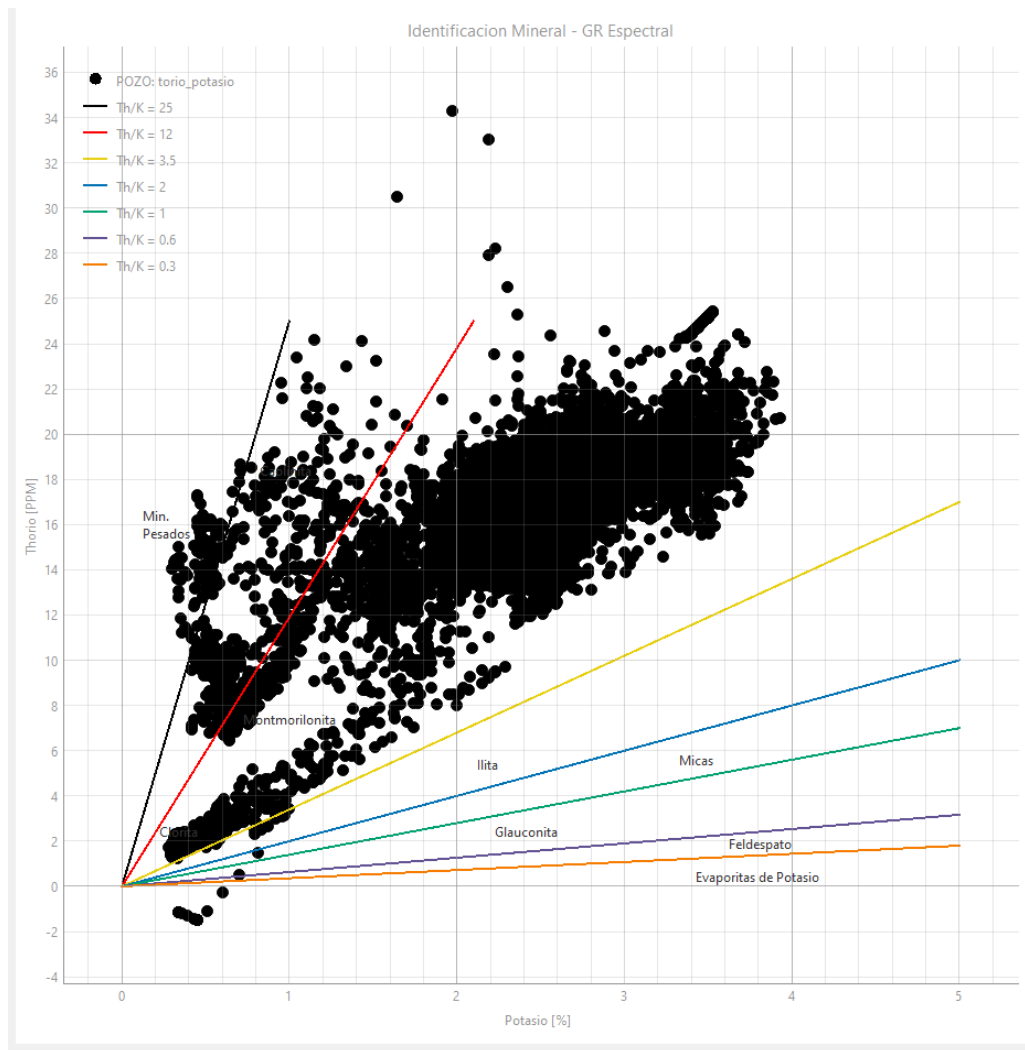


Fig. F.48: ejemplo de gráfico de dispersión de torio-potasio.

En gráfico correspondiente a la segunda pestaña, que contempla como entrada adicional el factor fotoeléctrico y cuyos ejes son Th/k y el PEF, también permite identificar distintos minerales según la presencia del registro en una determinada región del gráfico, pero en este caso, las secciones son rectangulares.

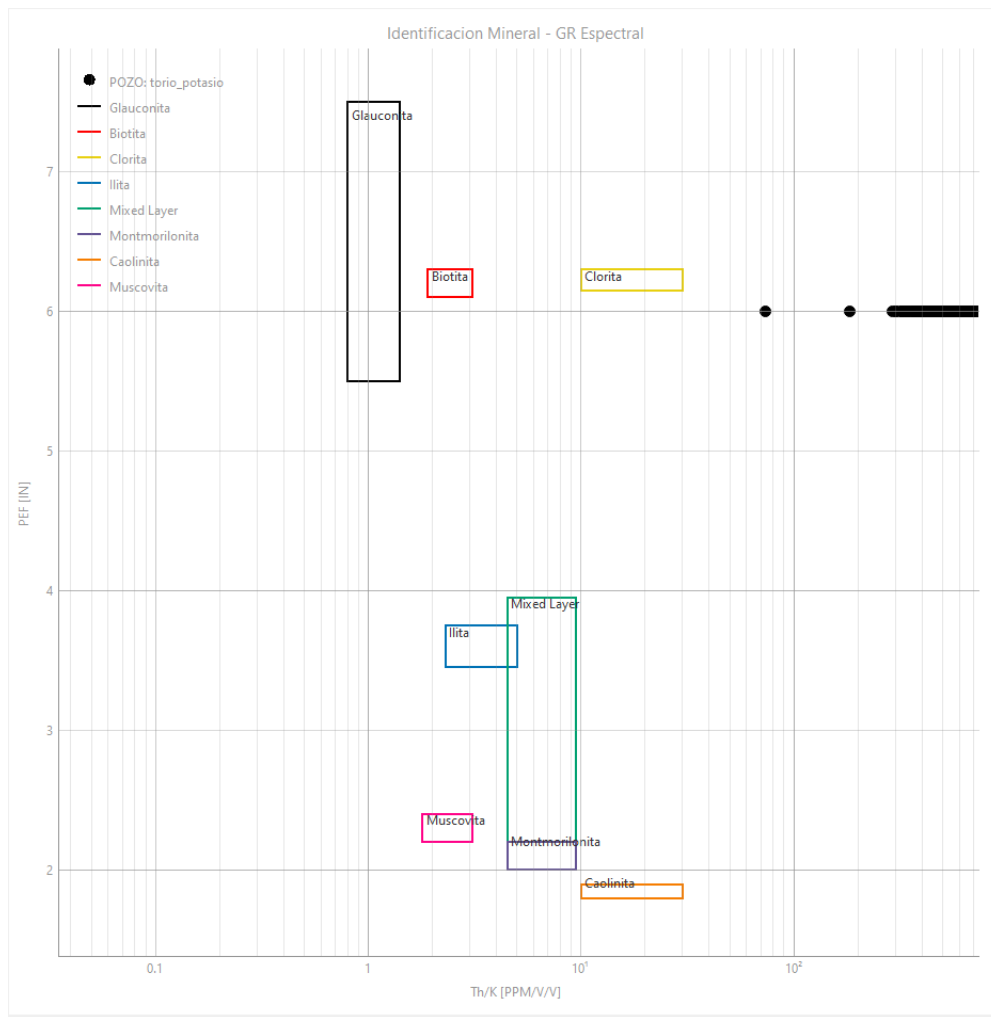


Fig. F.49: secciones para la identificación de mineralogía espectral GR utilizando el factor fotoeléctrico.

A4.14. Crossplot de Picket

El *Crossplot* de Picket [A-25] se logra como un diagrama de dispersión de resistividad y porosidad en escala logarítmica, contrastado con rectas asociadas a valores constantes de saturación de agua, los cuales se obtienen a partir de:

$$\text{Log}(PHIE) = \frac{\text{Log}(a) + \text{Log}(R_w) - n \text{Log}(S_w) - \text{Log}(R_t)}{m}$$

donde:

- R_t es la curva ingresada de resistividad profunda;
- R_w es la curva ingresada de resistividad del agua.
- S_w es la curva ingresada de saturación de agua.
- a , m y n son constantes ingresadas, con valores por defecto 1, 2 y 2, respectivamente.
- $PHIE$ es la curva ingresada de porosidad efectiva.

Los valores constantes que se consideran para las dispersiones son 1; 0,5; 0,3 y 0,15.

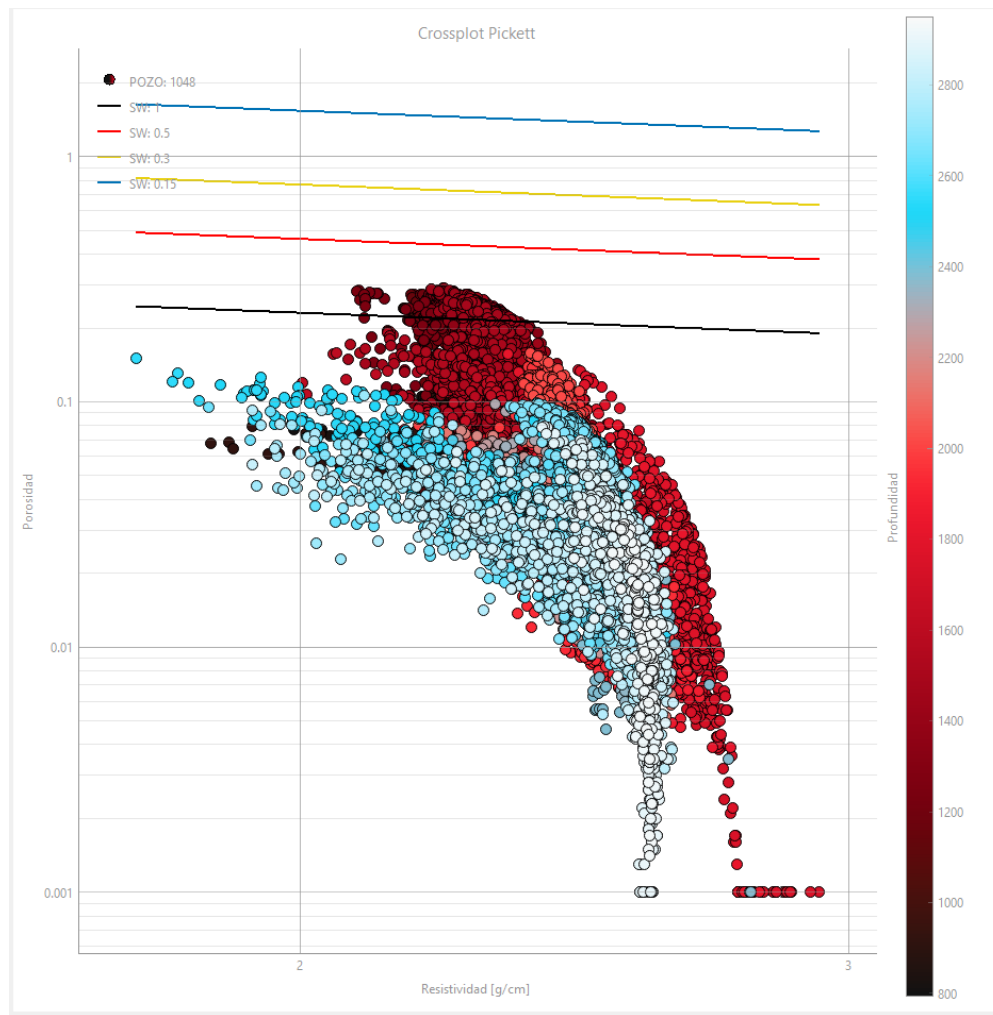


Fig. F.50: ejemplo de crossplot de Picket con eje de profundidad.

A4.15. Crossplot de Hingle

Este gráfico de dispersión [A-26] también tiene curvas asociadas a valores constantes de saturación de agua, pero no es en escala logarítmica, teniendo las rectas de referencia un origen común:

$$\left(\frac{1}{R_t}\right)^{1/m} = \left(\frac{S_w^n}{a R_w}\right)^{1/m} \cdot PHIE$$

donde:

- R_t es la curva ingresada de resistividad profunda.
- R_w es la curva ingresada de resistividad del agua.
- S_w es la curva ingresada de saturación de agua.
- a , m y n son constantes ingresadas, con valores por defecto 1, 2 y 2, respectivamente.
- $PHIE$ es la curva ingresada de porosidad efectiva.

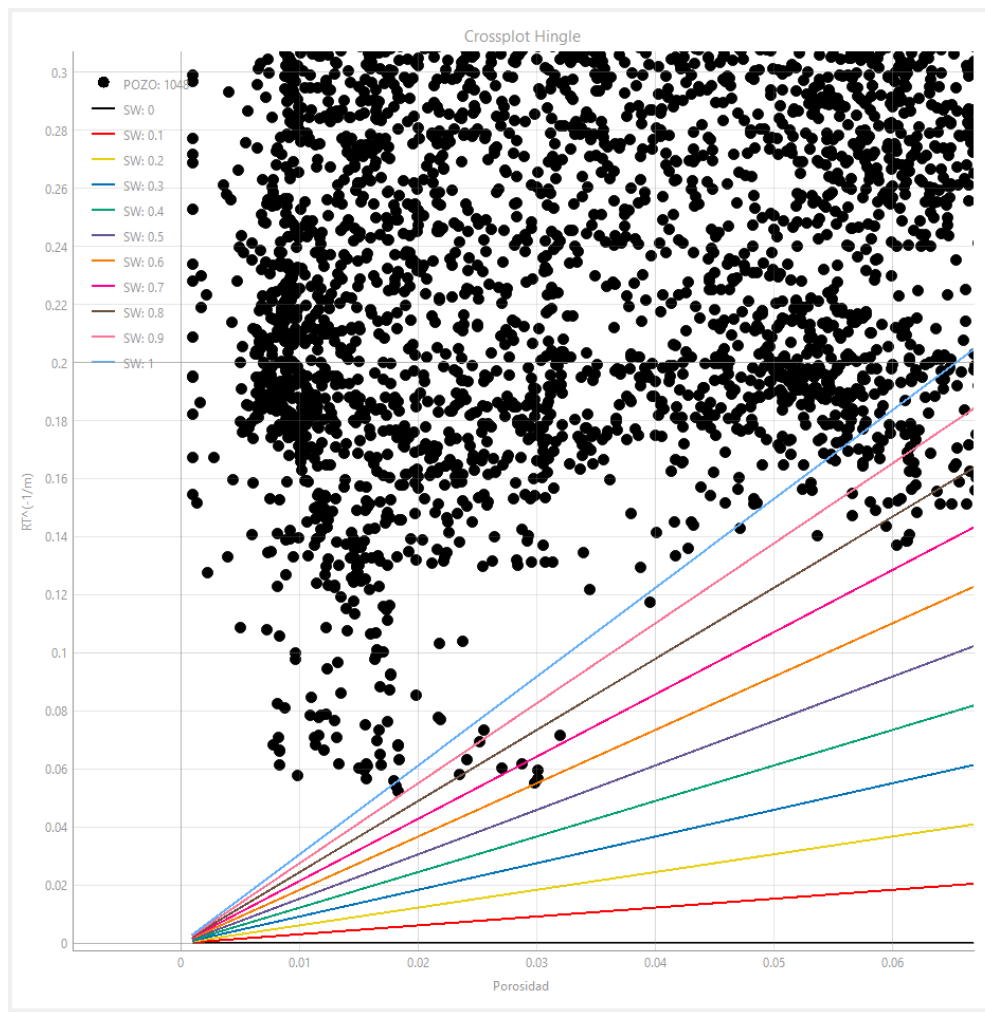


Fig. F.51: ejemplo de crossplot de Hingle.

A4.16. Crossplot de Buckles

El crossplot de Buckles [A-27] es un método gráfico donde se representa la saturación del agua contra la porosidad efectiva en un diagrama de dispersión para ver si el número de Buckles (el producto de la porosidad y la saturación de agua) es solidario a alguna de las curvas. En tal caso, la saturación de agua es el cociente entre el número de Buckles y la porosidad efectiva media, lo cual constituye una alternativa al cálculo analítico dado por el método de Timur (ver A4.6). Los números de Buckles graficados como referencia son los de valor 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,12; 0,14 y 0,16, permitiendo además definir un valor personalizado.

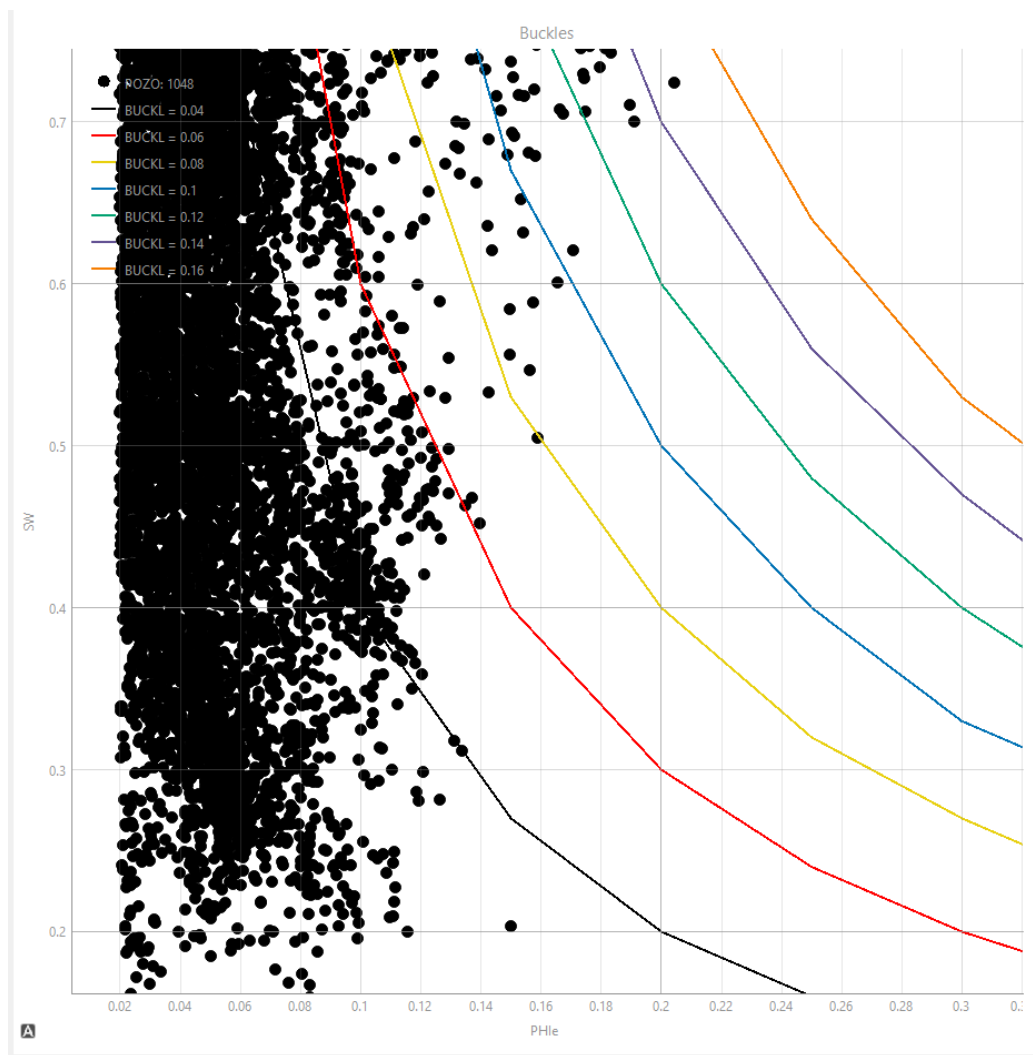


Fig. F.52: ejemplo de crossplot de Buckles.

A4.17. Histogramas

La aplicación permite realizar histogramas, pudiendo superponer hasta cuatro de estos gráficos en el visualizador y teniendo la posibilidad de elegir la cantidad de *buckets* (o "baldes") para generarlos. En cada uno puede mostrarse la curva de frecuencia acumulada y se puede comparar la distribución de la variable elegida con distribuciones bien conocidas, como la Normal, la Exponencial y la Uniforme. En caso de que se quiera hacer dicha comparación, la aplicación sugiere valores para los principales parámetros de la distribución bien conocida a contrastar de acuerdo a la curva elegida, pudiendo los mismos sobrecribirse para ajustarse lo buscado por un usuario.

Swirr (Timur)
Parametros de corte
Crossplot
Histogramas
IPR

Titulo del Histograma:

Titulo del Eje X:
☐ Invertir Eje X
☐ Log Eje X

Titulo del Eje Y:
☐ Invertir Eje Y

Profundidad
☒ Todo el LAS
☐ personalizado

Profundidad mín.:

Profundidad máx.:

Cantidad de Buckets

Cantidad de Histogramas

Histograma 1

Nombre del Histograma

Eje X

Color

Opacidad

☒ Mostrar Curva Acumulada

☐ Enviar al Frente

Agregar Distribucion

Beta (1/Lambda)

Color

Opacidad

☐ Mostrar Curva Acumulada

☐ Enviar distribucion al Frente

Fig F.53: menú del histograma.

Se deja a continuación un ejemplo simple del uso del histograma: al comparar la distribución de una curva con una distribución Normal (Fig. F.54), se puede ver que si se respeta el valor medio de la distribución de la curva (100) y se ingresa un valor de desvío (10), la variable de entrada no parece corresponderse con la respectiva frecuencia Normal generada.

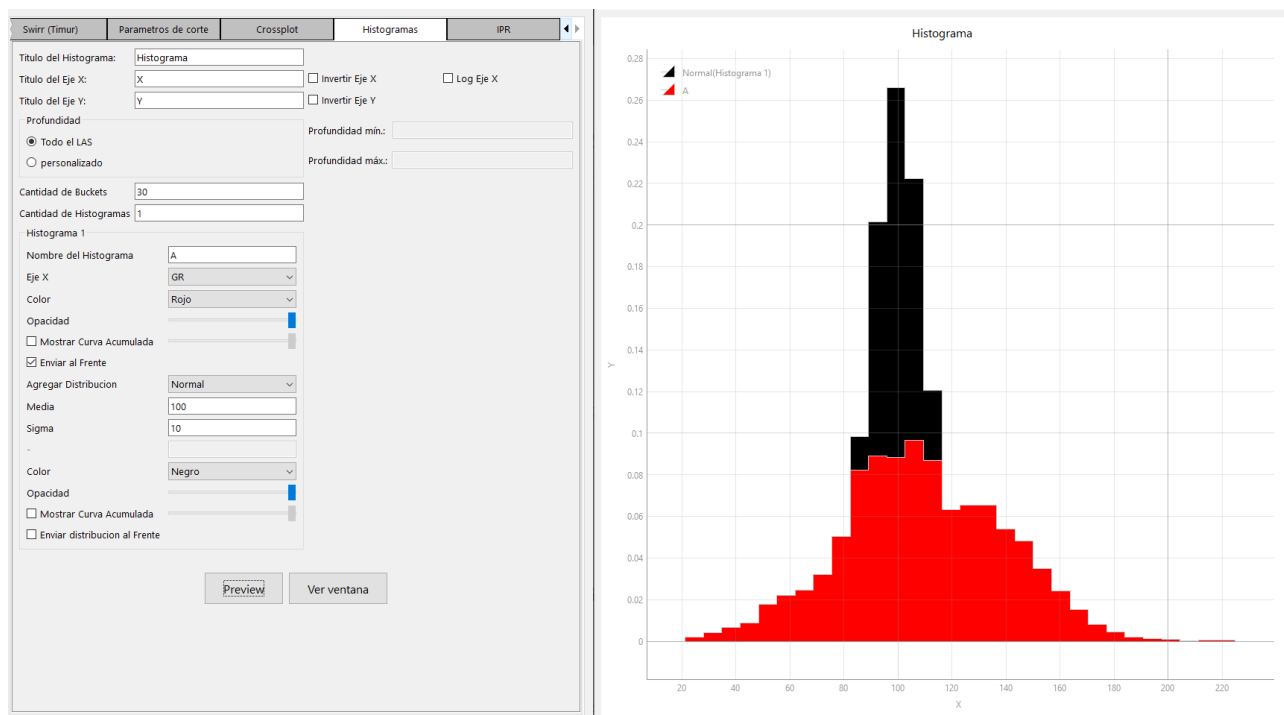


Fig. F.54: ejemplo de contraste de la distribución de una curva con una distribución normal.

Sin embargo, ajustando el valor de desvío de 10 a 50 hace que se vea la similaridad entre la distribución Normal y distribución de la curva. Para apreciar esto, puede ser útil "enviar al frente" esta última (usando el *checkbox* correspondiente).

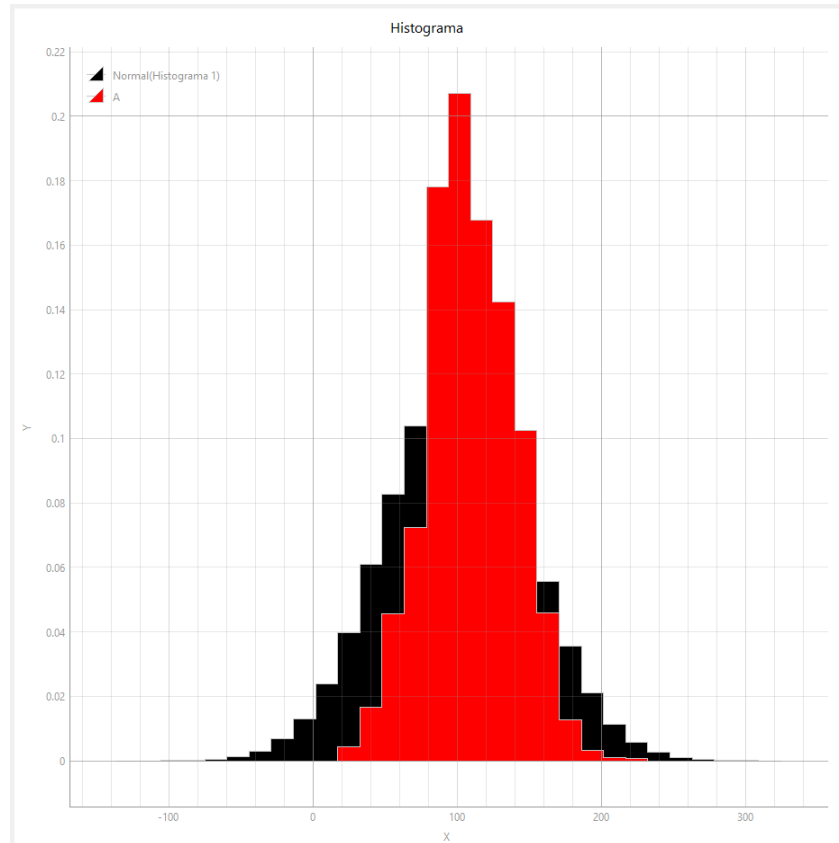


Fig. F.55: ejemplo del contraste entre una curva y una distribución.

Por otra parte, pueden aumentarse la cantidad de *buckets* para visualizar de forma más nítida las distribuciones.

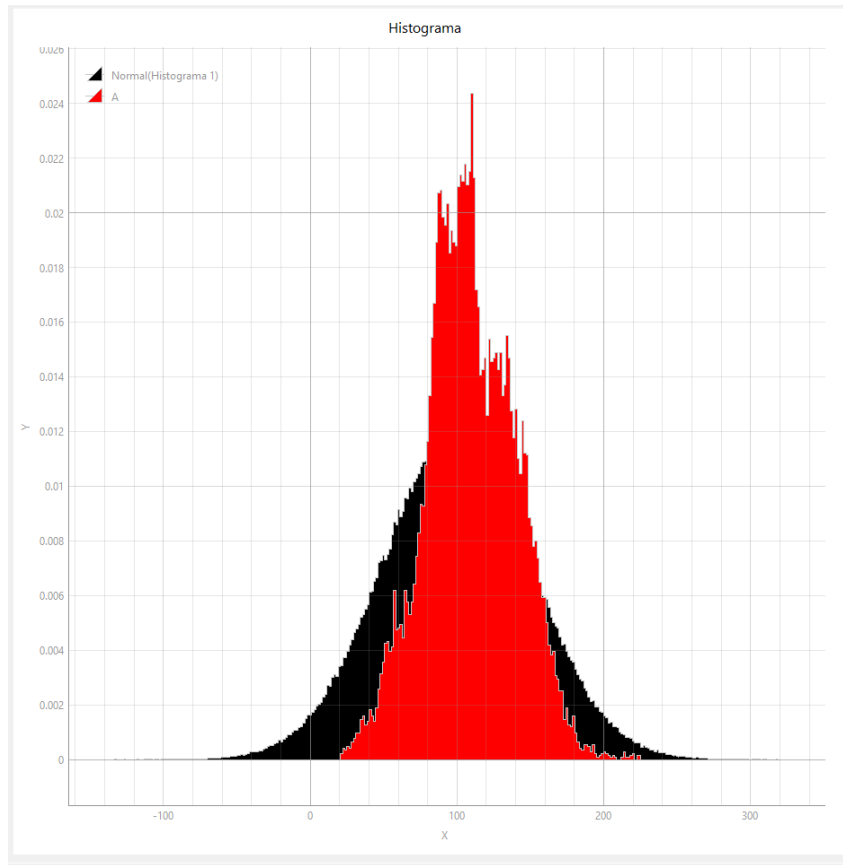


Fig. F.56: ejemplo de histograma con 300 *buckets*.

A4.18. Índice de productividad

La aplicación permite el cálculo del índice de productividad o IPR a través de 5 métodos, los cuales se describen a continuación.

Darsy [A-28]:

$$J = \frac{0.00708 \, k \, h}{\mu_o B_o \left(\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + s \right)}$$

donde:

- μ_o es la constante ingresada de viscosidad;
- B_o es la constante ingresada del factor de volumen;
- r_e es la constante ingresada del radio del reservorio;
- r_w es la constante ingresada del radio del pozo;
- k es la curva ingresada de permeabilidad;
- h es la curva ingresada de espesor neto (*net pay*);
- s es una constante ingresada.

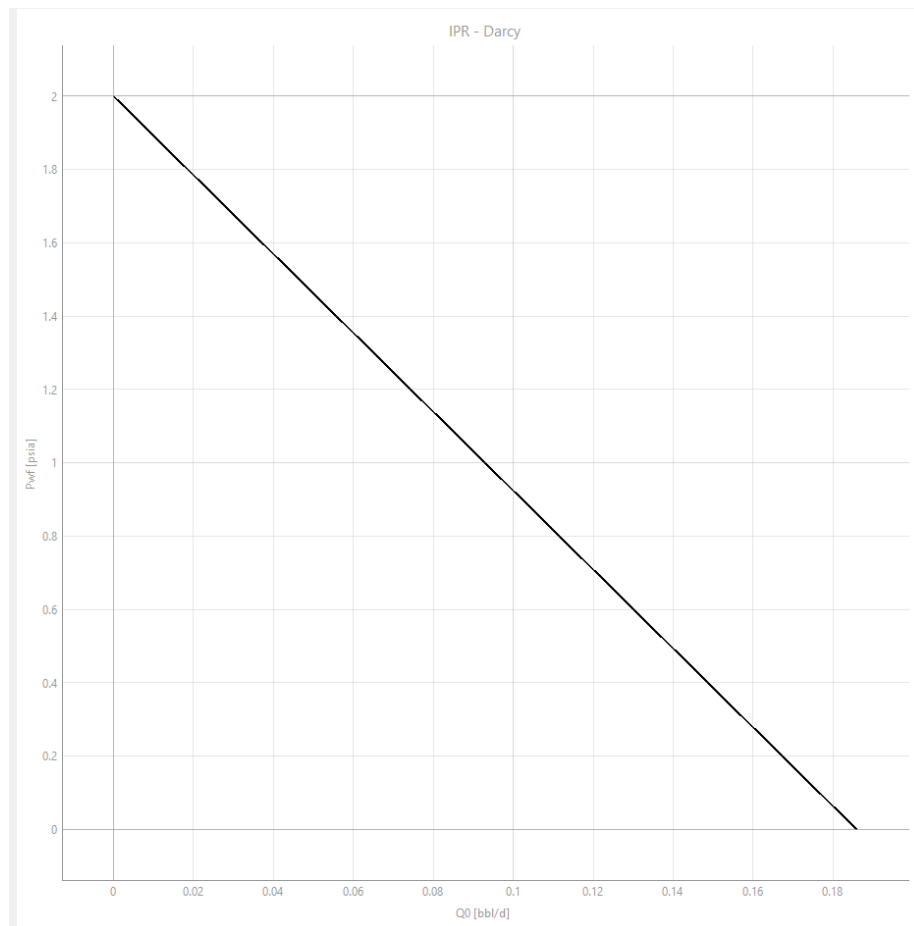


Fig. F.57: ejemplo de cálculo de Darcy.

Voguel [A-29]:

$$\frac{Q_o}{(Q_o)_{max}} = 1 - 0.2 \left(\frac{p_{wf}}{\bar{p}_r} \right) - 0.8 \left(\frac{p_{wf}}{\bar{p}_r} \right)^2$$

donde:

- p_{wf} y Q_o son valores que se hacen variar en el rango de 0 a $Q_o \text{ max}$;
- $Q_o \text{ max}$ es una constante ingresada;
- \bar{p}_r es una constante ingresada.

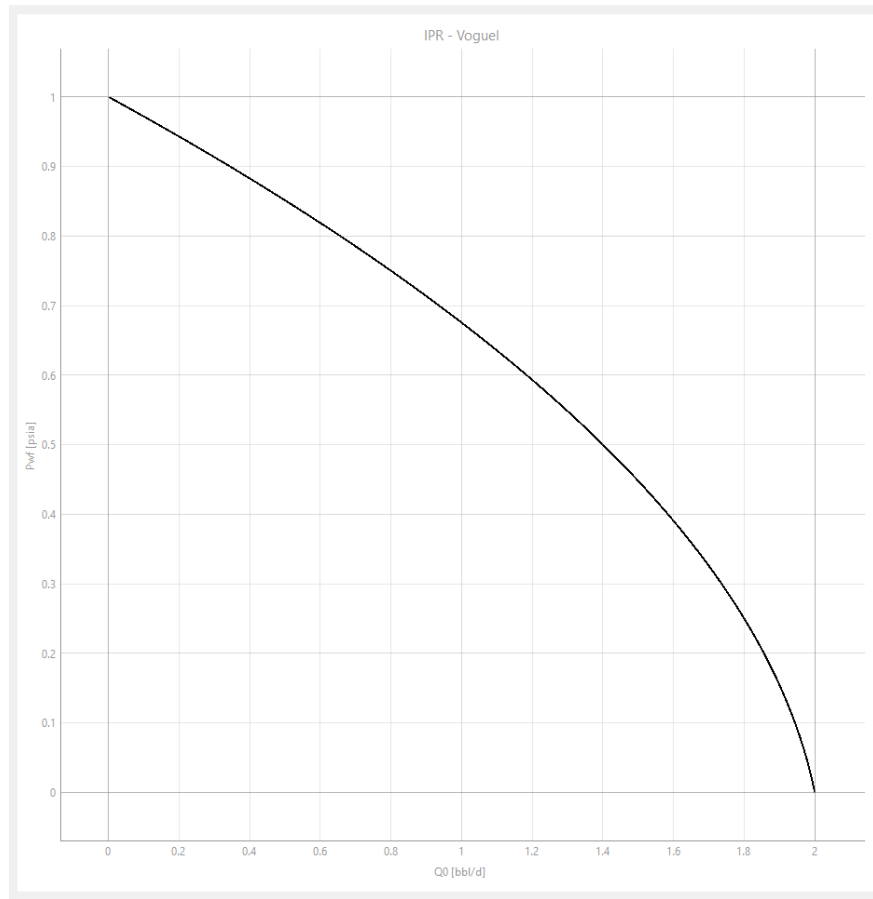


Fig. F.58: ejemplo de cálculo de Darcy.

Brown [A-30]:

$$Q_o(p_{wf}) = \begin{cases} J(\bar{p}_r - p_{wf}) & p_b \leq p_{wf} \leq \bar{p}_r \\ J \left((\bar{p}_r - p_b) + \frac{p_b}{1.8} \left(1 - 0.2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right) - 0.8 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right) \right) & 0 < p_{wf} < p_b \end{cases}$$

donde:

- J es el valor obtenido en el modelo de Brown;
- p_{wf} se hace variar entre 0 y la cota superior respectiva para cada parte de la expresión;
- \bar{p}_r es una constante ingresada;
- p_b es una constante ingresada.

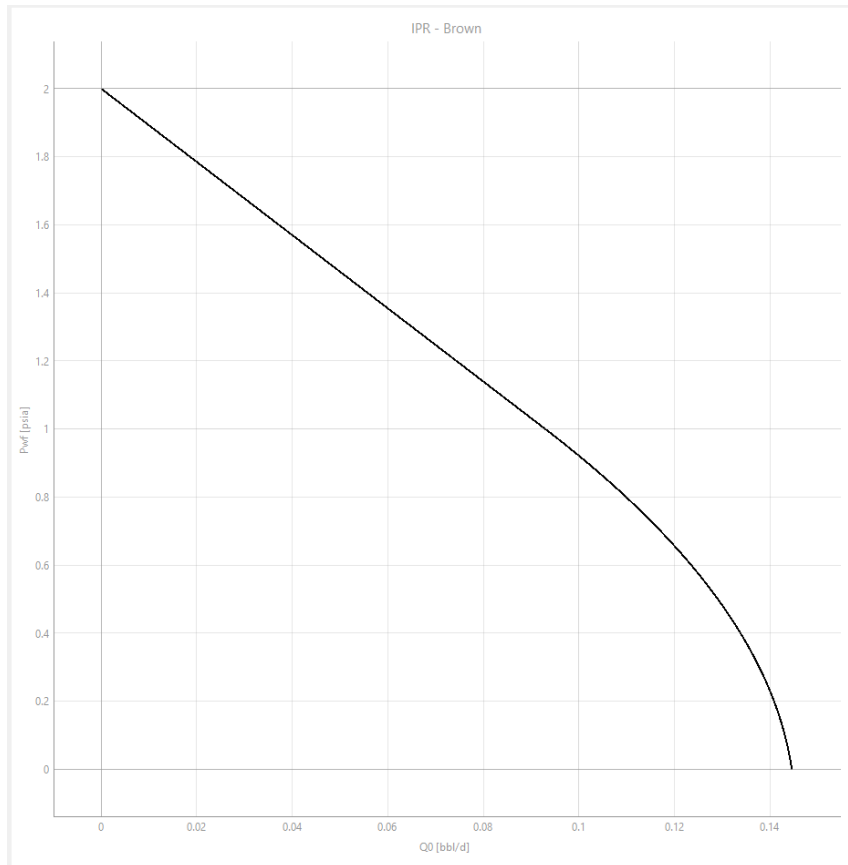


Fig. F.59: ejemplo de cálculo de Brown.

Klins-Clark [A-31]:

$$\frac{Q_o}{(Q_o)_{max}} = 1 - 0.295 \left(\frac{p_{wf}}{\bar{p}_r} \right) - 0.705 \left(\frac{p_{wf}}{\bar{p}_r} \right)^d$$

donde:

$$d = \left[0.28 + 0.72 \left(\frac{\bar{p}_r}{p_b} \right) \right] (1.24 + 0.001 p_b)$$

- p_{wf} y Q_o son valores que se hacen variar en el rango de 0 a $Q_o \text{ max}$.
- $Q_o \text{ max}$ es una constante ingresada.
- \bar{p}_r es una constante ingresada.

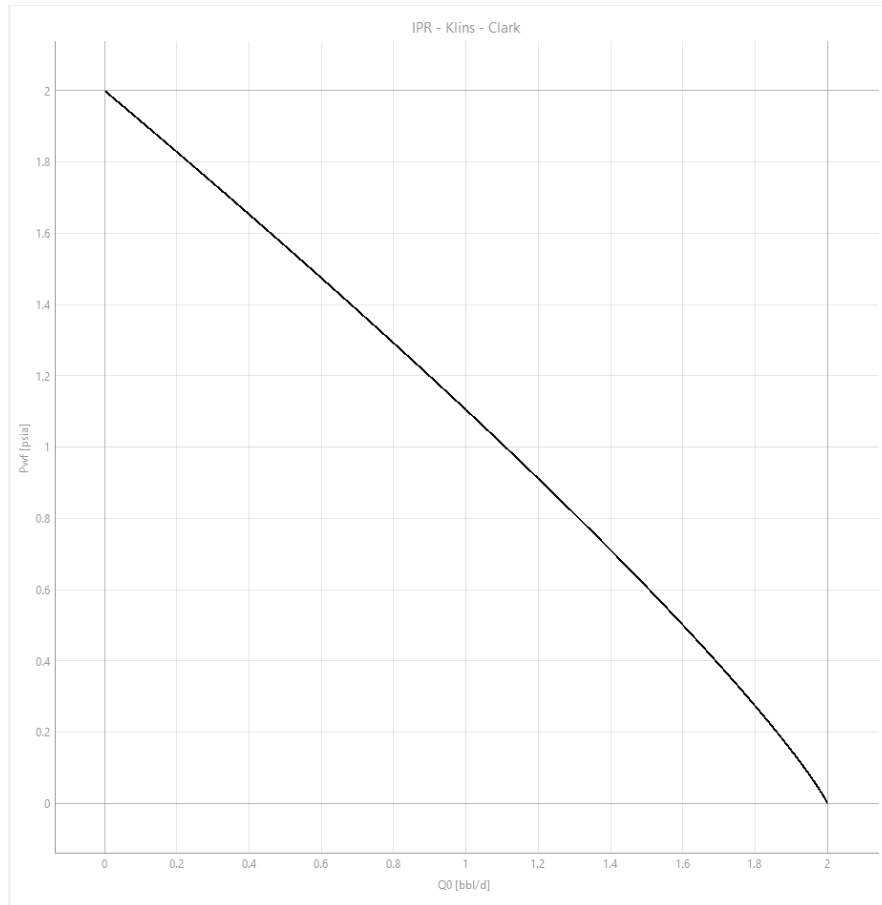


Fig. F.60: ejemplo de cálculo de Klins-Clark.

Fetkovich [A-32]:

$$Q_o(p_{wf}) = \begin{cases} J1(\bar{p}_r - p_{wf}) & \bar{p}_r > p_b, p_{wf} > p_b \\ J2 (0.5 p_b) (\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2)^n & \bar{p}_r < p_b, p_{wf} < p_b \\ J1(p_b - p_{wf}) + J2 (0.5 p_b) (\bar{p}_r^2 - p_b^2)^n & \bar{p}_r > p_b, p_{wf} < p_b \end{cases}$$

donde:

$$J1 = \frac{0.00708 k h}{\mu_o B_o \left(\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + s \right)} \quad J2 = \frac{0.00708 k h}{\mu_o p_b B_o p_b \left(\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + s \right)}$$

- p_{wf} y Q_o son valores que se hacen variar en el rango de 0 a $Q_o \text{ max}$.
- μ_o es la constante ingresada de viscosidad.
- B_o es la constante ingresada del factor de volumen.
- $\mu_o p_b$ es la constante ingresada de viscosidad.
- \bar{p}_r es una constante ingresada.

- p_b es una constante ingresada.
- s es una constante ingresada.
- μ_0 es la constante ingresada de viscosidad.
- B_0 es la constante ingresada del factor de volumen.
- r_e es la constante ingresada del radio del reservorio.
- r_w es la constante ingresada del radio del pozo.
- k es la curva ingresada de permeabilidad.
- h es la curva ingresada de espesor neto (*net pay*).

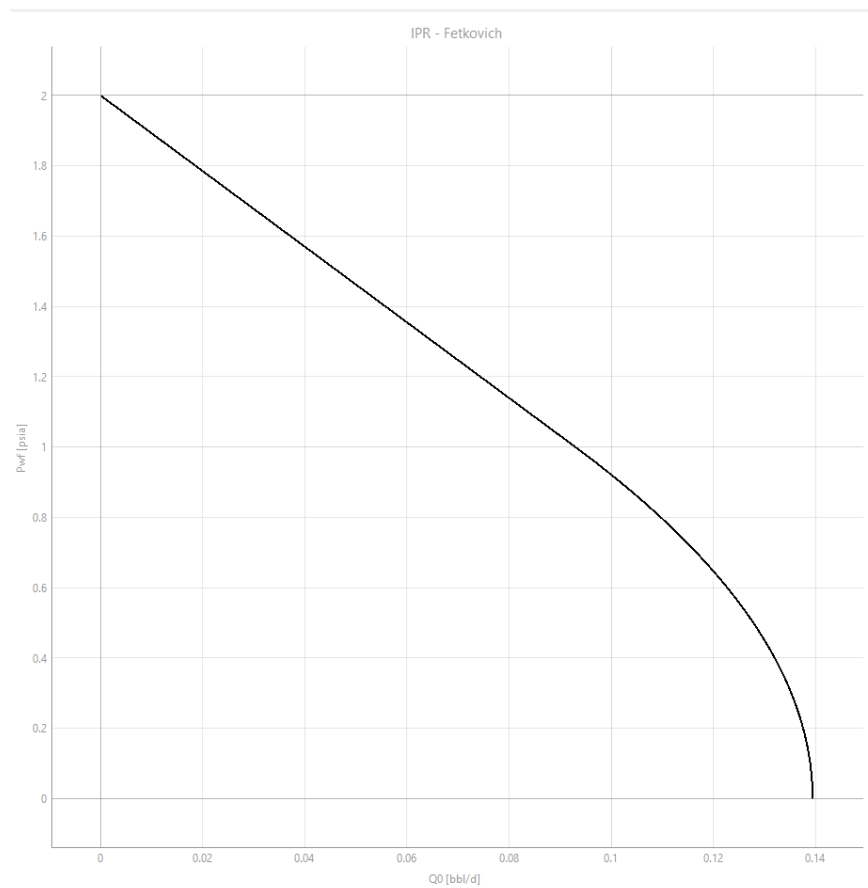


Fig. F.61: ejemplo de cálculo de Fetkovich.

A5. Manejo de curvas de profundidad

En la sección "Curvas de profundidad", se puede acceder a un menú que permite la manipulación de las pistas verticales donde se encuentran las curvas de profundidad, incluyendo la posibilidad del agregado de curvas en pistas nuevas y borrado de las ya existentes.

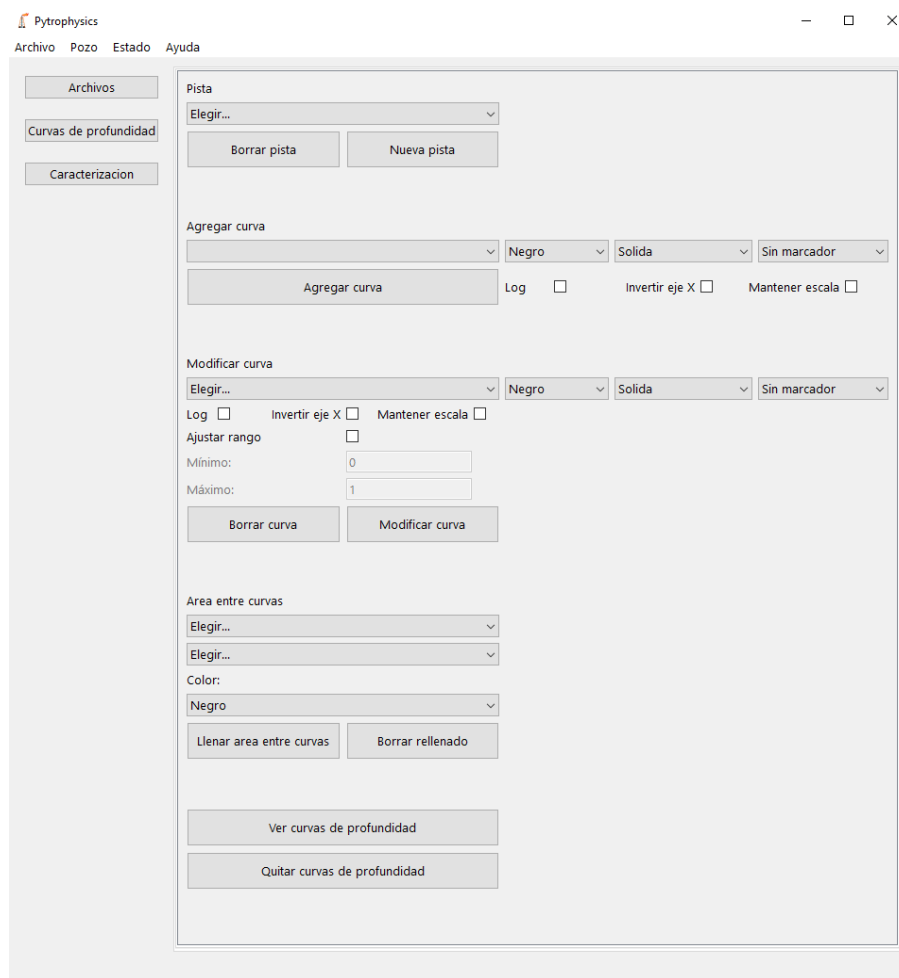


Fig. F.62: menú de curvas de profundidad.

Se parte de un selector que permite borrar pistas de curvas de profundidad existentes. Al lado del botón que permite esta última funcionalidad (autoexplicativa), se da la posibilidad de crear una nueva pista en blanco. La misma puede ser utilizada (al igual que las pistas provenientes de cálculos realizados) para agregar, modificar o quitar curvas de profundidad existentes, utilizando todas opciones estéticas que aparecen más abajo: definir un color, utilizar escala logarítmica, etc.

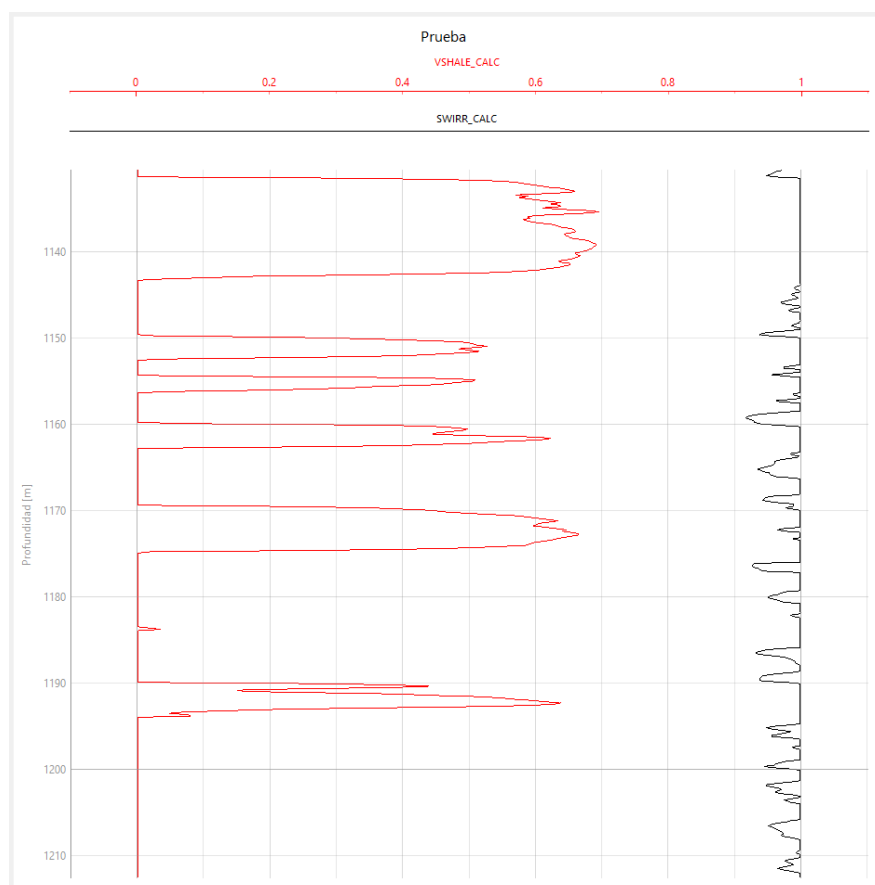


Fig. F.63: ejemplo de pista realizada por el usuario: se visualizan directamente dos curvas del pozo, con distintos colores y un mismo eje (la segunda curva se ajusta a la escala de la primera, utilizando la opción correspondiente del menú).

Siguiendo con el ejemplo presentado en la imagen anterior, si se elige la pista "Prueba" en la sección de "modificar curva" y se destilda la propiedad de "Mantener escala" para la curva de *Swirr*, al hacer clic en "Modificar curva", las mismas se verán cada una con su eje, que es también el comportamiento por defecto si se agrega una curva en una pista ya existente.

La sección de "Curvas de profundidad" también da la posibilidad de rellenar el área entre dos curvas graficadas en una pista. El orden en el que se ingresen las curvas en la parte inferior de la pantalla es indistinto, incluso para el cambio de color o el borrado de un relleno ya existente.

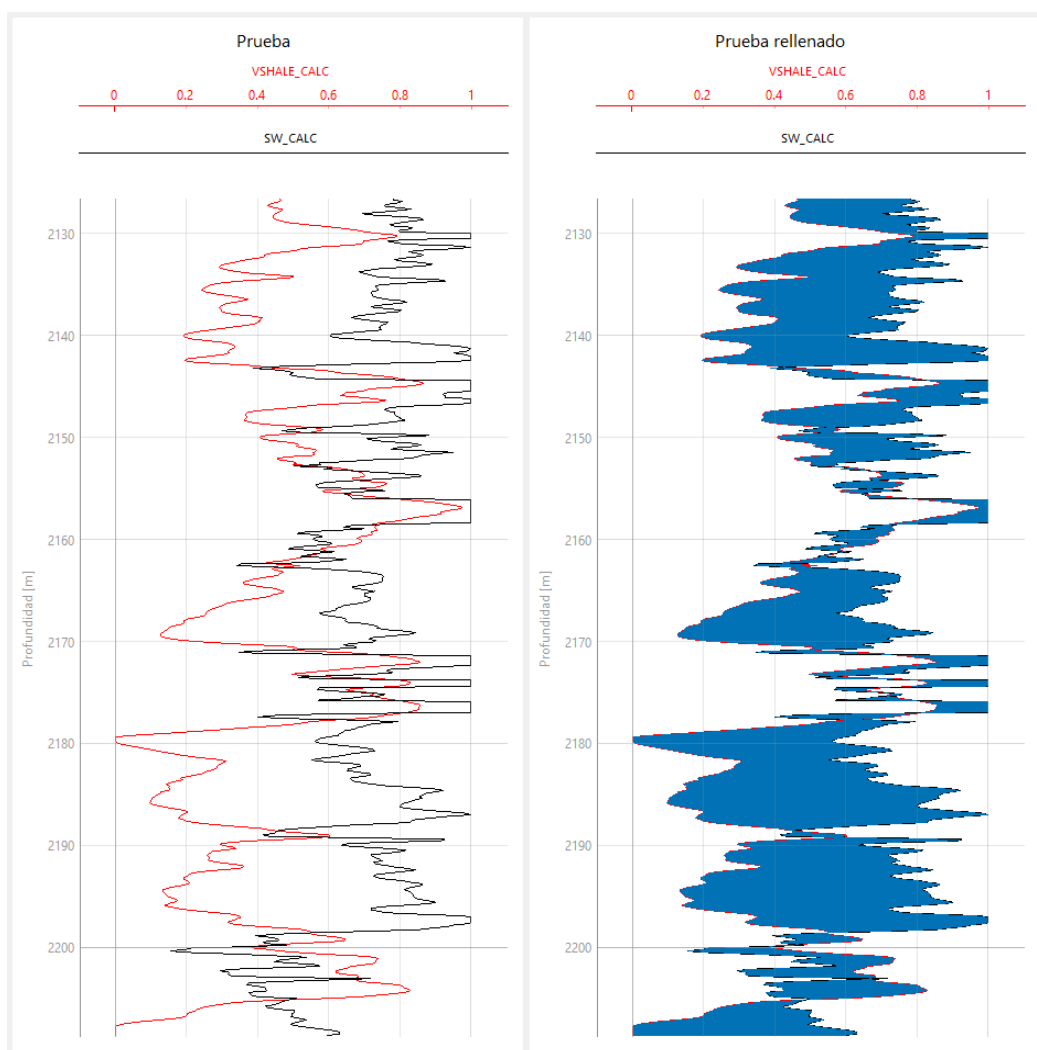


Fig. F.64: ejemplo de rellenado entre curvas. A la izquierda, para contrastar, se muestran las mismas dos curvas, pero sin rellenado. En ambos casos, las pistas fueron creadas por el usuario.

Incluso utilizando el rellenado, si se "ajusta" el rango de la curva principal (en el ejemplo dado por la imagen anterior es la de *Vshale*, ya que la de saturación de agua está acoplada a su escala) con la opción correspondiente debajo del subtítulo "Modificar curva", entonces se restringirá también el rango de la curva con la escala ajustada, mostrando el rellenado solo de la sección acotada correspondiente.

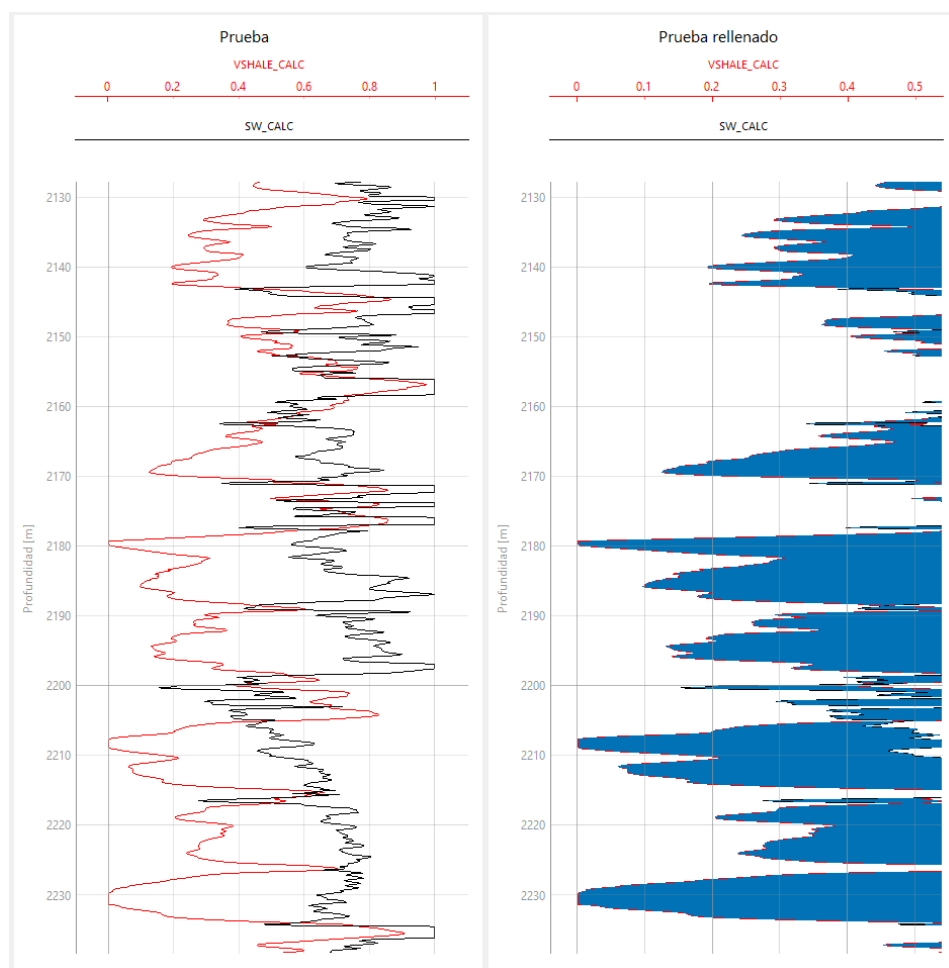


Fig. F.65: ejemplo de combinación de modificaciones para curvas de profundidad: una curva (Sw) tiene su rango restringido por estar acoplada a otra cuyo rango se ajustó. El rellenado también mantiene esta propiedad. A la izquierda, se tienen las mismas curvas sin ajuste y sin rellenado para contrastar.

Se hace notar que la funcionalidad de restringir el rango en la sección de "Curvas de profundidad" solo oculta información de la curva, a diferencia del valor de ajuste de rango en las pestañas de "Porosidad total" (ver A4.3), por ejemplo, que modifican la curva de salida, haciendo que ningún valor de la curva quede por fuera del rango especificado por el usuario.

Como comentario adicional, la sección de "Curvas de profundidad" permite realizar modificaciones sobre pistas provenientes de cálculos, por ejemplo, en el caso de un cálculo de porosidad efectiva (ver A4.4) donde se quiere contrastar directamente el resultado con una curva ya existente del mismo tipo (en vez de guardar la curva calculada y hacer la comparación en una nueva pista). En ese caso, el agregado de la curva puede hacerse seleccionando directamente la pista generada como resultado del cálculo. Una consecuencia de hacer esto es que al recalculer la porosidad efectiva en su sección correspondiente, la pista donde se visualiza la salida seguirá conteniendo la curva agregada por fuera del cálculo, así como cualquier otra modificación que se realice sobre la pista.

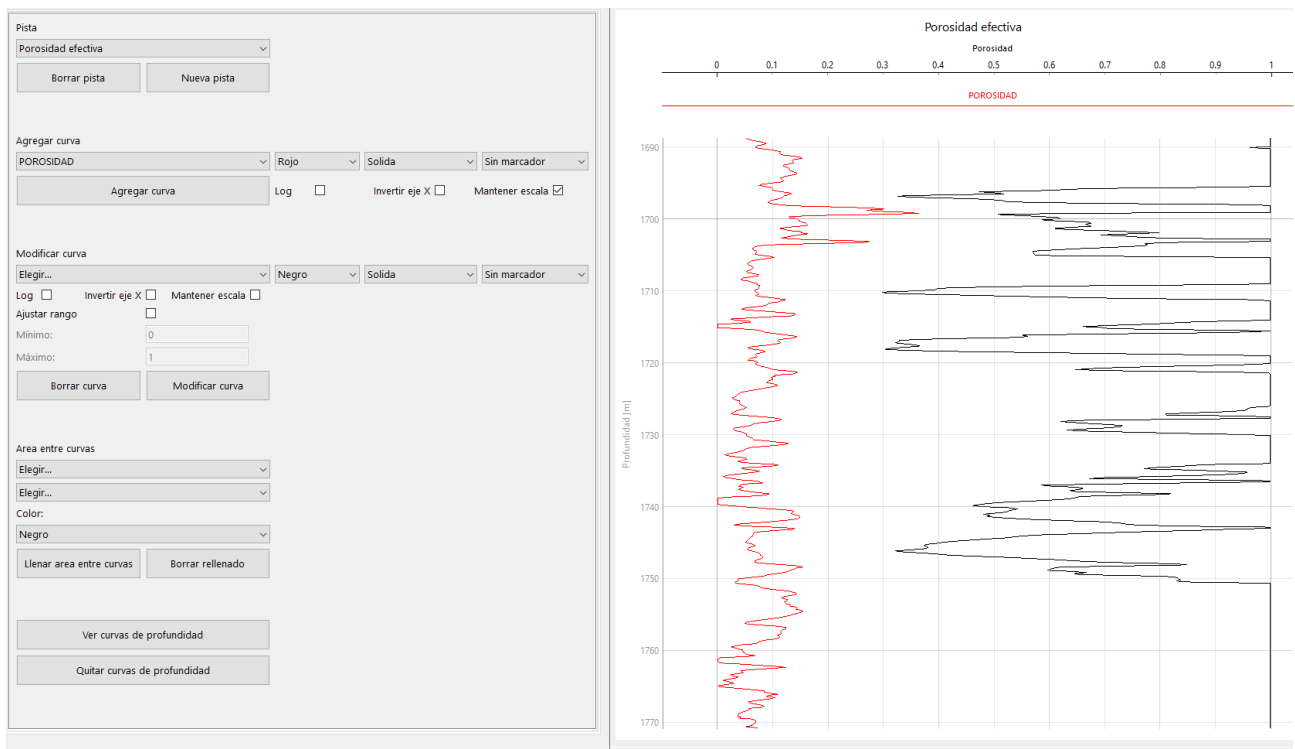


Fig. 66: ejemplo de modificación de una pista resultante de un cálculo: a la pista de "porosidad efectiva", asociada al cálculo respectivo, se le agregó una curva que no forma parte de la salida de la pantalla.

A6. Referencias

- [A.1] - Z. Bassiouni. Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs. Society of Petroleum Engineers, Texas, 1994.
- [A.2] - V. V. Larionov. Borehole Radiometry. Nedra, Moscú, 1969.
- [A.3] - S. J. Thomas E. C. - Stieber. The Distribution of Shale in Sandstones and Its Effect upon Porosity. 1975.
- [A.4] - Clavier C. - Hoyle W. - Meunier D. Quantitative Interpretation of Thermal Neutron Decay Time Logs Part I: Fundamentals and Techniques. Journal of Petroleum Technology, 23(06), 1971.
- [A.5] - A. Poupon - C. Clavier - J. Dumanoir - R. Gaymard - A. Misk. Log Analysis of Sand-Shale Sequences: A Systematic Approach. Journal of Petroleum Technology, 22(7), 1970.
- [A.6] C.R. Asquith G.B. - Gibson. Basic Well Log Analysis for Geologists. The American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Tulsa, 1982.
- [A.7] L. W. Wyllie M. R. J. - Gregory A. R. - Gardner. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. 1956.
- [A.8] Raymer L. L. - Hunt E. R. - Gardner J. S. An improved sonic transit time-to-porosity transform. 21st Ann. Log. Symp., Soc. Prof. Well Log Analysts, 1980.
- [A.9] - Arps, J.J.. "Analysis of Decline Curves." Trans. 160 (1945): 228–247. doi: <https://doi.org/10.2118/945228-G>
- [A.10] - G. E. Archie. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Trans AIME, 146(01), 1942.

- [A.11] - Clavier C. - Coates G. - Dumanoir J. Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of Shaly Sands. Society of Petroleum Engineers Journal, 24(02), 1984.
- [A.12] - P. Simandoux. Measures die techniques an milieu application a mesure des saturation en eau, etude du comportement de massifs agrileux. Review du Institute Francais du Patrole, 18 (Supplementary Issue), 1963.
- [A.13] - Bardon Ch. - Pied B. Formation Water Saturation In Shaly Sands. 10th Ann. Log. Symp., Soc. Prof. Well Log Analysts, 1969.
- [A.14] - Poupon, A. y Leveaux, J. (1971) Evaluation of Water Saturation in Shaly Formations. SPWLA 12th Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- [A.15] - Fertl, Walter H. "Shaly Sand Analysis In Development Wells." Paper presented at the SPWLA 16th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, 1975.
- [A.16] - Tixier, M. (1949). Evaluation of permeability from electric-log resistivity gradients. The Oil and Gas Journal, 16, 113-133.
- [A.17] - Coates, G. R., & Dumanoir, J. L. (1973). A new approach to improved log-derived permeability. In SPWLA 14th Annual Logging Symposium. OnePetro.
- [A.18] - Timur, A. (1968). An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships. In SPWLA 9th annual logging symposium. OnePetro.
- [A-19] - Implementación de Random Forest en SKLearn - Consultado en: 20/4/2023
URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html>
- [A-20] - Implementación de XGBoost de SKLearn - Consultado en: 20/4/2023
URL - <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.GradientBoostingClassifier.html>
- [A-21] - Implementación de Ada de SKLearn - Consultado en: 20/4/2023
URL - <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.AdaBoostClassifier.html>
- [A-22] - Implementación de Decision Tree como Regresor de SKLearn - Consultado en: 26/4/2023
URL - <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeRegressor.html>
- [A-23] - L. P. Stinco. Introducción a la caracterización de reservorios de hidrocarburos - Empleo de técnicas de subsuelo en la evaluación de formaciones. Asociación Geológica Argentina Serie "B" (didáctica y complementaria) N.º 25, Buenos Aires, 2001.
- [A-24] - Schlumberger. Log Interpretation Charts. Schlumberger Wireline Testing, Houston, 1997.
- [A-25] - G. R. Pickett. Pattern Recognition As A Means Of Formation Evaluation - The Log Analyst, 14(04). 1973.
- [A-26] - A. Hingle. The use of logs in exploration problems - SEG 29th International Annual Meeting, Los Angeles. 1959.
- [A-27] - R. S. Buckles. Correlating and Averaging Connate Water Saturation Data. Journal of Canadian Petroleum Technology, 4(01), 42-52., 1965.
- [A-28] - T. Ahmed. Reservoir Engineering Handbook. Elsevier, Burlington, 2006.
- [A-29] - J. V. Vogel. Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Wells. Journal of Petroleum Technology, 20(01), 83-92, 1968.
- [A-30] - K. Brown. The Technology of Artificial Lift Methods - Volume 4 - Production Optimization of Oil and Gas Wells by Nodal System Analysis. PennWell Books, Tulsa, 1984.

[A-31] - M. A. Kilns y J. W. Clark. An Improved Method To Predict Future IPR Curves - SPE Reservoir Engineering 8(04), 243–248. 1993.

[A-32] - M. Muskat y H. H. Evinger. Calculations of Theoretical Productivity Factor. Trans - AIME, 146(01), 126–139. 1942.