

Geoestadística aplicada a la distribución de arcillas, Yacimiento Inferior, edad Eoceno, al Occidente de Venezuela

Reinaldo Jose Mundo Morales¹; Riccia Andreina Granado Parra¹; Jhoan Jose Urdaneta¹

doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revfue.v18n2-2020002> 

Forma de citar: Mundo-Morales, R. J., Granado-Parra, R. A., & Urdaneta, J. J. (2020). Geoestadística aplicada a la distribución arcillas, yacimiento c inferior, edad eoceno, al occidente de Venezuela. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 18(2), 31-50. <https://doi.org/10.18273/revfue.v18n2-2020002>

Resumen

El estudio se desarrolló en la Unidad de Producción Lagomar, en el Campo Urdaneta Lama, yacimiento C-5-X-18. El trabajo de investigación es de tipo proyectiva y está dividido en seis fases, que permitió recopilar, analizar e interpretar información de la propiedad petrofísica denominada volumen de arcillosidad (Vsh), mediante la aplicación de métodos geoestadísticos, para generar un modelo de distribución en el área. Esta investigación se ejecutó a través del estudio del análisis de laboratorio de Difracción de Rayos X (DRX) sobre las muestras de canal (muestras de zanja) de los 13 pozos seleccionados, permitiendo interpretar los datos de los mismos, para la determinación del porcentaje correspondiente a los minerales de arcillas más comunes que conforman el Vsh presente en el yacimiento, obteniendo cuatro tipos de arcilla, tales como: Caolinita como mayor aporte, seguidamente Illita + Esmeclita, después la Illita y por último la Clorita. A su vez, se identificaron los 25 pozos que atravesaron el yacimiento y poseen registros convencionales y un pozo que posee registros especiales, permitiendo interpretar los mismos mediante las cartas litológicas de perfiles, arrojando un predominio de arcilla como la montmorillonita, Clorita, Illita y mezcla de arcillas. A su vez, se generaron los variogramas experimentales de cada uno de los tipos de arcilla de los datos de DRX, ajustando todas las curvas con el variograma teórico potencial, con el fin de aplicar el método de estimación de Kriging, para realizar la distribución espacial de los contenidos de minerales de arcillas en zonas donde no existen datos de pozos (DRX). Por último, se generaron los mapas que representan la distribución de los tipos de arcilla del yacimiento C-5-X-18.

Palabras clave: distribución, geoestadística, volumen de arcilla, difracción de rayos x, kriging.

Geostatistics applied to the distribution of clays, lower c reservoir, west of Venezuela

Abstract

The study was carried out at the Lagomar Production Unit, in the Urdaneta Lama Field, in the reservoir C-5-X-18. The research work is projective and divided in six phases, establishing a methodology that allowed compiling, analyzing and interpreting information of the petrophysical property called shale volume (Vsh), through the application of geostatistical methods, to generate a model of distribution in the area. This research was carried out through X-ray diffraction (XRD) laboratory analysis on channel samples of the 13 selected wells, allowing interpreting the data, to determination of diferents clay types content (percentage). That form the Vsh present in the reservoir, obtaining four types of clay, such as: kaolinite as the largest contribution, then illite + esmeclite, then the illite and finally the chlorite. At the same time, 25 wells that crossed the site were identified and they have conventional logs and a well that has special logs, allowing them to interpret them by means of the lithological charts of logs, with a predominance of clay such as montmorillonite, chlorite, illite and mix of these clays. The experimental variograms of each types of clay the XRD data were generated, adjusting all the curves with the potential theoretical variogram, in order to apply the Kriging estimation method, for the calculation of the percentages of each type of clay in wells with no XRD data. Finally generated the maps that represent the distribution of the clays of the C-5-X-18 reservoir.

Keywords: distribution, geostatistical, shale volume, channel samples, x-ray diffraction, variogram, kriging.

¹Petróleos de Venezuela, reinaldomudo@gmail.com; granadopra@gmail.com; urdanetajxx@gmail.com

Introducción

El Campo Urdaneta Lama presenta una moderada complejidad estructural y estratigráfica, y dispone de poca información con referencia a la distribución espacial de los minerales de arcillas presentes en el yacimiento C-5-X-18, por lo tanto, se requiere definir un modelo de distribución de los mismos, mediante métodos y técnicas geoestadísticas³, las cuales, permiten definir el comportamiento de los minerales de arcilla presentes en el yacimiento en estudio, determinando la distribución de las mismas dentro del volumen total de arcilla, predecir el volumen de los minerales de arcilla en zonas donde se carece de información mineralógica, considerando la información existente. Por otra parte, la predicción estará condicionada a la distribución de los datos en el yacimiento. Para efectos de esta investigación, se cuenta con cincuenta y siete (57) análisis de laboratorio de difracción de rayos X de muestras de canal asociadas a trece (13) pozos, así como también, se cuenta con perfiles convencionales y especiales de los cuarenta (40) pozos que atravesaron el yacimiento C-5-X-18.

El trabajo de investigación estará dividido en seis (06) fases, estableciendo una metodología que permita recopilar, analizar e interpretar información de DRX y perfiles que poseen los pozos del área.

Como primera fase, se plantea la descripción de los DRX ejecutados a las muestras de canal; luego se determinan los tipos de arcillas mediante los perfiles de pozos del área. Una vez descritos los tipos de arcilla mediante DRX y perfiles, se procederá en la tercera fase, comparar ambos análisis; la cuarta fase, permite determinar el modelo de volumen de arcilla. La quinta fase enmarca la aplicación de los variogramas experimentales para definir el variograma teórico de cada tipo de arcilla presente, con el fin de aplicar el método de estimación de kriging, siendo ésta la última fase de esta investigación, la cual, permita conocer el comportamiento de la distribución de cada tipo de arcilla presente en el área.

Ubicación Geográfica del yacimiento C-5-X-18

A nivel local, el estudio fue realizado en el Campo Urdaneta Lama, perteneciente a la Unidad de Producción Lagomar, el cual, se encuentra situado en la parte Centro-Norte del Lago de Maracaibo, ocupando una extensión de 1475 acres y encontrándose al Oeste del Bolque I. Específicamente, el área de estudio, las arenas C de la Formación Misoa, como se muestra en la Ilustración 1.

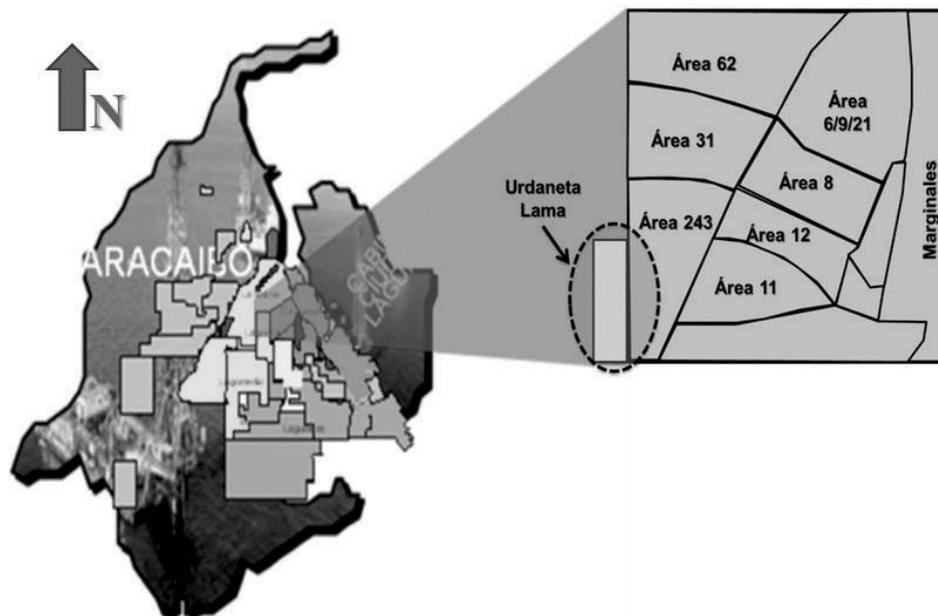


Ilustración 1. Ubicación espacial del Campo Urdaneta Lama, Unidad de Producción Lagomar, Cuenca del Lago de Maracaibo. Realizado: R. Mundo, G. Granado, J. Urdaneta (2019).

Metodología aplicada para el Modelo de Distribución Geoestadística

Para definir el modelo geoestadístico de distribución de tipos de arcillas para el yacimiento C-5-X-18, se aplicó

una metodología estructurada según la información disponible del área, la cual, abarca una serie de procedimientos con el fin de alcanzar los objetivos planteados en este trabajo de investigación, que se puede observar en el Flujograma de la Ilustración 2.

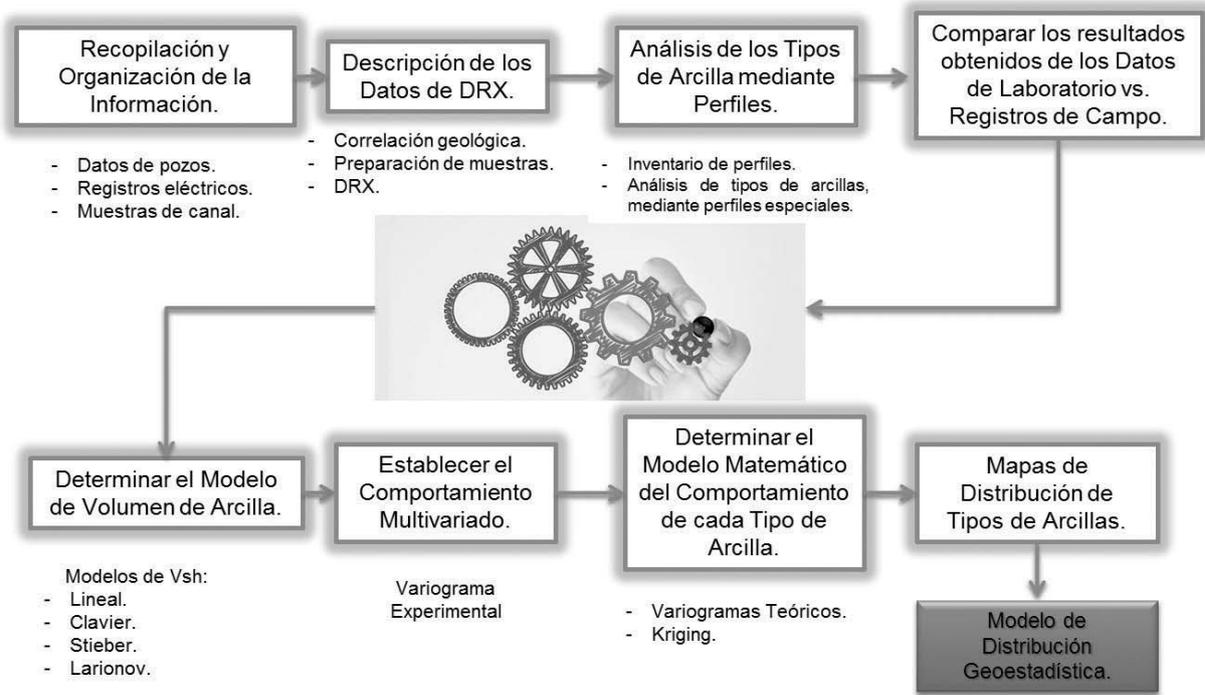


Ilustración 2. Flujograma de la metodología aplicada para esta investigación.

Resultados de la Investigación

Las muestras de canal se seleccionaron mediante la elaboración de secciones estratigráficas y estructurales de pozos con rípios a lo largo y ancho del yacimiento,

con la finalidad de identificar los niveles de máxima inundación presente en el mismo, obteniendo la muestra más idónea para realizar el DRX, planteado por Brindley, G & Brown, G (1980). En la siguiente Ilustración se presenta una sección estratigráfica:

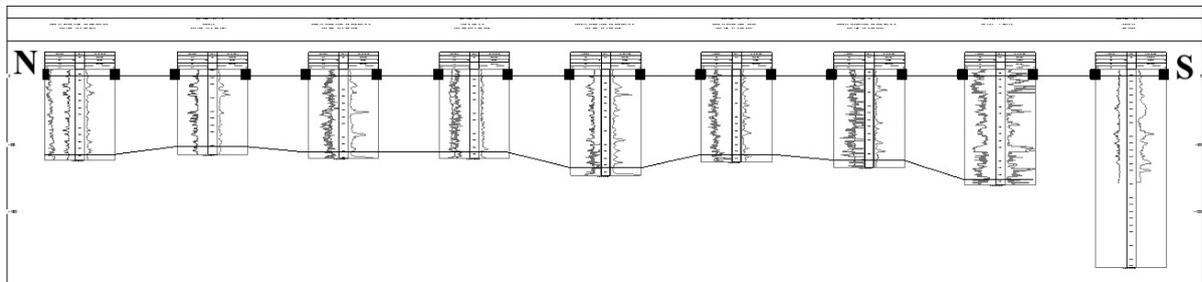


Ilustración 3. Sección estratigráfica, dirección N – S del yacimiento C-5-X-18.

Descripción e Interpretación de tipos de arcilla mediante perfiles de pozos

Para los análisis los tipos de arcillas presentes en el yacimiento C-5-X-18, con base a los perfiles existentes de los 40 pozos que atraviesan el yacimiento, se pudo identificar los registros convencionales, tales como, Gamma Ray, SP y Factor Ilustracióneléctrico, así como también, cuál de ellos tienen registros especiales, específicamente GR Espectral, con la finalidad de no descartar ningún tipo de datos y poder predecir el volumen de arcillas total y los tipos de minerales comunes de arcilla dentro del yacimiento C-5-X-18. Estas curvas permitirán establecer en los objetivos siguientes el modelo de volumen de arcilla que

predomina en el yacimiento. Se obtuvo un (01) pozo, con Rayos Gamma Espectral (UD0731), determinando la distribución de los tipos de arcillas, basado en la aplicación de las cartas descriptivas de litologías, Schlunberger (2012).

En la Ilustración 5 se visualiza el método práctico para identificar el tipo de arcilla aplicado al pozo, donde se muestra un *crossplot*, con los valores del factor Ilustracióneléctrico (Pe) y la concentración de potasio (K) del perfil Espectrometría Natural de Rayos Gamma (NGS), donde se observa un porcentaje predominante de montmolilonita y arcillas mixtas.

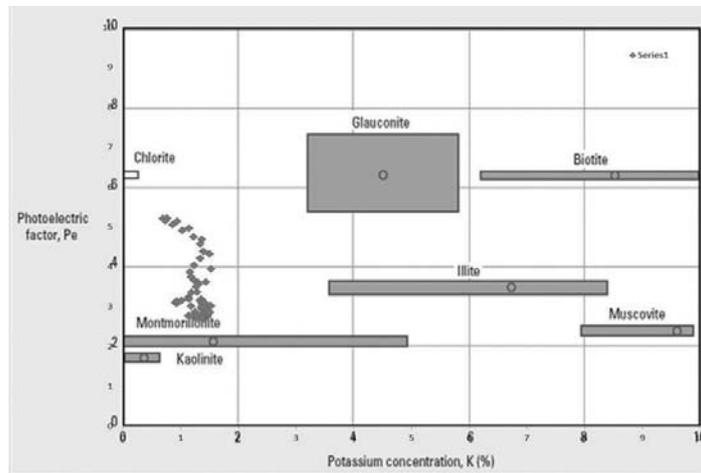


Ilustración 5. Cartas de litología, factor Ilustracióneléctrico con relación a la concentración porcentual del potasio.

Por otra parte en la Ilustración 6, se puede observar el método práctico para identificar el tipo de arcilla, aplicando los valores del factor Ilustracióneléctrico

(Pe) y la relación de Torio / Potasio (Th/K) del perfil NGS, proporcionando una evaluación mineral donde resaltan las arcillas mixtas.

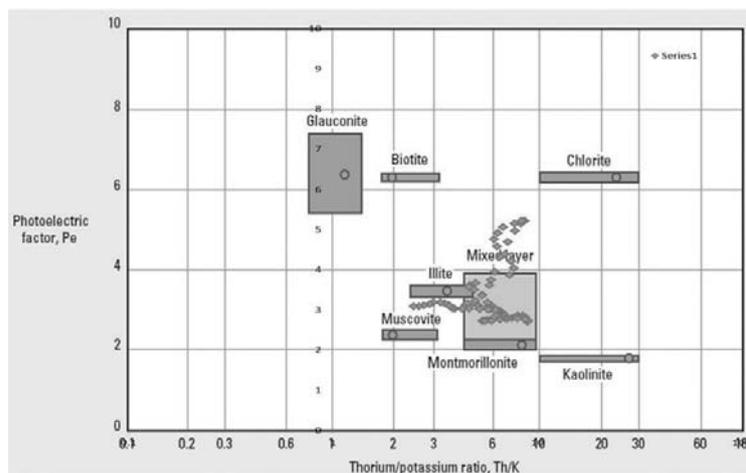


Ilustración 6. Factor Ilustracióneléctrico con relación al torio/potasio del pozo UD0731.

Se realizó otro *crossplot* (ilustración 7), donde se plasmaron los valores de torio versus potasio del perfil NGR del pozo UD0731, permitiendo observar un predominio de la montmorillonita y arcillas mixtas,

como principales tipos de minerales arcillosos presente en dicho pozo, de igual modo, se observa una presencia de caolinita, clorita e illita en menor proporción.

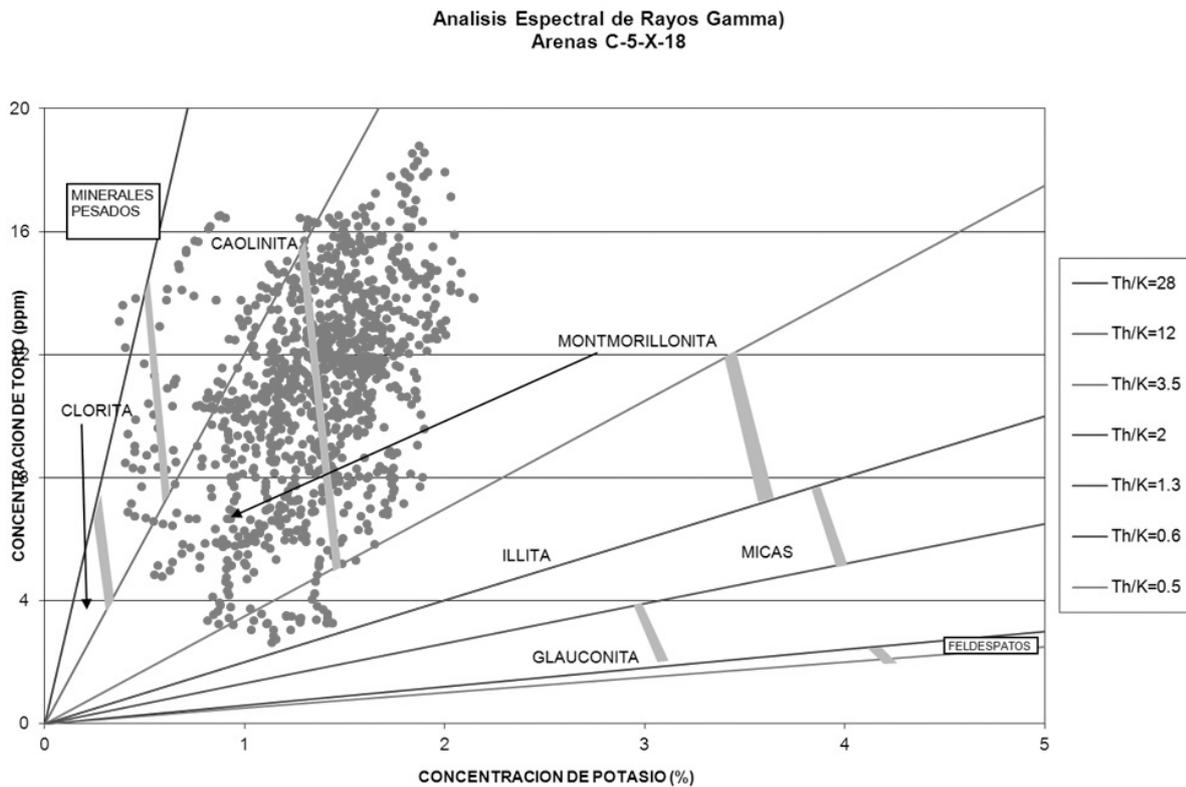


Ilustración 7. Carta de litología, torio/potasio, del pozo UD0731.

Se realizó una verificación del tipo de lodo de perforación utilizado al momento de perfilaje en el pozo UD731 para descartar que el Pe este afectado por las propiedades reológicas del mismo, y realmente se observó un volumen elevado de elementos pesados como la barita, afectando considerablemente la respuesta con referencia a los minerales de arcillas presente en el reservorio.

El procedimiento de la determinación de los tipos de arcilla mediante la interpretación de perfiles de pozo se realizó con el fin de comparar con los resultados de los tipos de arcillas obtenidos de los datos de laboratorio

del yacimiento C-5-X-18 y no descartar ningún tipo de información existente en el reservorio, donde se analizó cada respuesta de los resultados arrojados por los 57 DRX provenientes de las muestras de canal y de los perfiles de pozos pertenecientes al área de estudio.

Comparación de los resultados de laboratorio y perfiles de campo

Los resultados de las muestras de canal y de la interpretación de perfiles de pozo fueron plasmados en una serie de gráficos comparativos estableciéndose un conjunto de tendencias y relaciones por modelos matemáticos que permiten reflejar la geometría y continuidad de las propiedades de los yacimientos con un gran efecto al momento de predecir o estimar el comportamiento de la distribución de los tipos de arcillas.

Para iniciar la comparación se elaboró un análisis estadístico básico de los resultados obtenidos en los DRX presentado por Peinado A. (1996), mostrados en la tabla 2, obteniendo la media, mediana, moda,

desviación estándar y varianza de la variable de estudio, arrojando valores consistentes en la dispersión de los datos por cada tipo de arcilla presente en el yacimiento de interés. Para la desviación estándar se muestran

valores bajos sobre cuánto puede ser la lejanía de las variables aleatorias (VA) con respecto a la media, así como, en la varianza, se visualizan valores moderados de cuan alejado se encuentran las VA con respecto al promedio.

Tabla 2. Valores estadísticos de los 57 análisis de laboratorio DRX (promedio por pozo) del yacimiento C-5-X-18.

POZO	CAOLINITA	CLORITA	CAOL+CLO	ILLITA	ILLITA-ESMEC.	CORRENSITA	GLAUCONITA	ESMECTITA
UD0052	63,582	4,697	0	15,6	16,121	0	0	0
UD0060	46,017	7,251	0	24,155	22,577	0	0	0
UD0062	54,881	5,26	0	12,564	27,295	0	0	0
UD0063	64,909	6,946	0	16,556	11,589	0	0	0
UD0065	54,145	6,725	0	11,536	27,594	0	0	0
UD0066	61,824	12,74	0	13,297	12,139	0	0	0
UD0067	48,803	11,469	0	23,559	16,169	0	0	0
UD0078	59,379	9,208	0	22,784	8,63	0	0	0
UD0701	49,37	12,598	0	17,291	20,74	0	0	0
UD0713	50,67	4,263	0	26,212	18,855	0	0	0
UD0718	48,205	13,584	0	21,556	16,655	0	0	0
UD0779	51,615	10,231	0	22,388	15,765	0	0	0
UD0807	49,996	11,1	0	12,391	26,513	0	0	0
Media	53,777	8,889	0	17,76	17,52	0	0	0
Mediana	51,615	9,208	0	17,291	16,655	0	0	0
Moda	N/A	N/A	0	N/A	N/A	0	0	0
Desviación Estándar	6,0776	3,12983	0	4,9737	5,9073	0	0	0
Varianza	36,938	9,79585	0	24,738	34,897	0	0	0

Por otra parte, se elaboraron gráficos de dispersión del Vsh versus cada tipo de arcilla presente en el yacimiento como lo expresa Gringarten E. & Deutch C.V. (1999), a través del cual, se determina la tendencia de los valores cercanos de la caolinita con respecto al volumen de arcilla total, y se obtuvo una tendencia lineal, que se puede expresar mediante la siguiente ecuación: caolinita = 0.6166 (Vsh)^{0.9613}, con un R² = 0.77.

Del mismo modo en la ilustración 8, se determina la tendencia de los valores muy dispersos de la clorita con respecto al Vsh total, con una tendencia lineal, expresada con la siguiente ecuación: clorita = 0.0532 (Vsh)^{1.495}, con un R² = 0.05.

De igual manera en la Ilustración 9, se presenta la tendencia de los valores de comportamiento moderado de la illita con respecto al volumen de arcilla total, con una tendencia polinómica de cuarto orden, expresado con la ecuación: illita = 1E-05(Vsh)⁴ - 0,0012(Vsh)³ + 0,0455(Vsh)² - 0,4813(Vsh) + 3,78340 con un R² = 0.33.

Por último, se presenta la tendencia de los valores de comportamiento aceptable de la illita + esmectita con respecto al volumen de arcilla total, con una tendencia polinómica de tercer orden, expresada con la ecuación: illita + esmectita = -0,0001(Vsh)³ + 0,0166(Vsh)² - 0,3945(Vsh) + 4,1255, con un R² = 0.52.

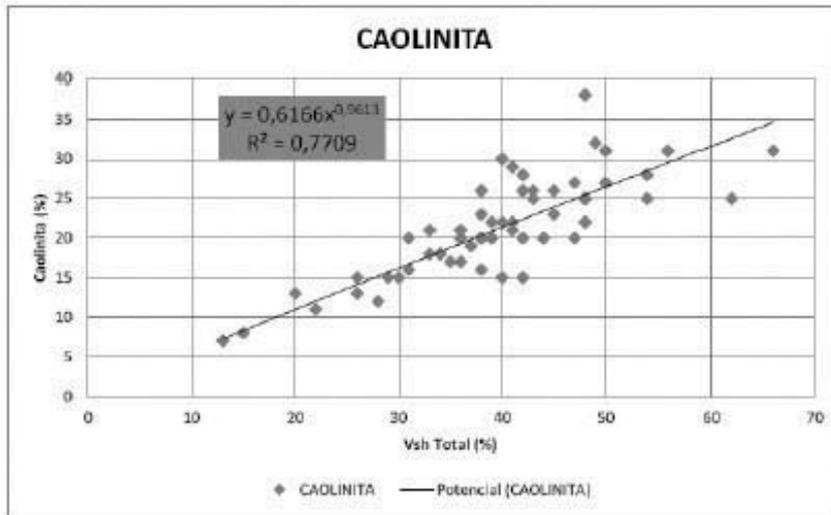


Ilustración 8. Gráfico de dispersión de la caolinita en función del Vsh del yacimiento.

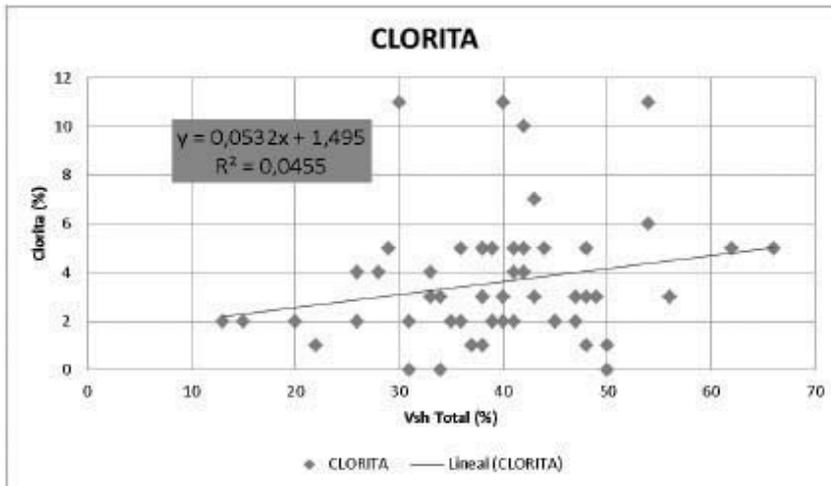


Ilustración 9. Gráfico de dispersión de la clorita en función del Vsh del yacimiento.

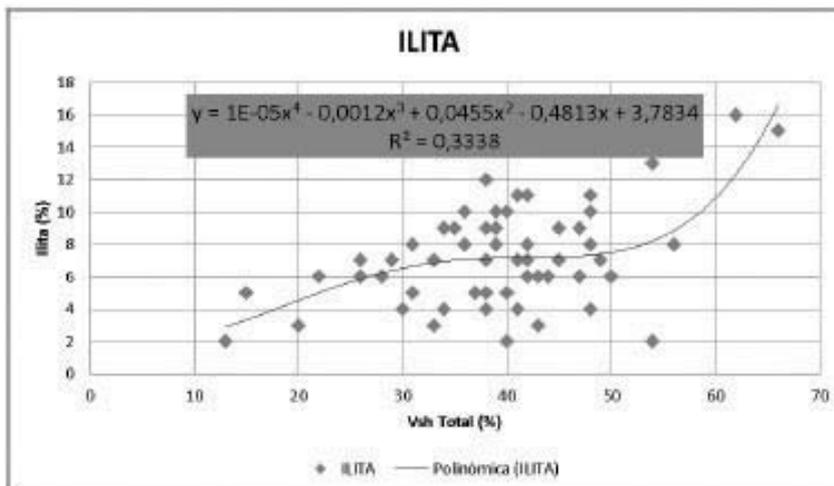


Ilustración 10. Gráfico de dispersión de la illita en función del Vsh del yacimiento.

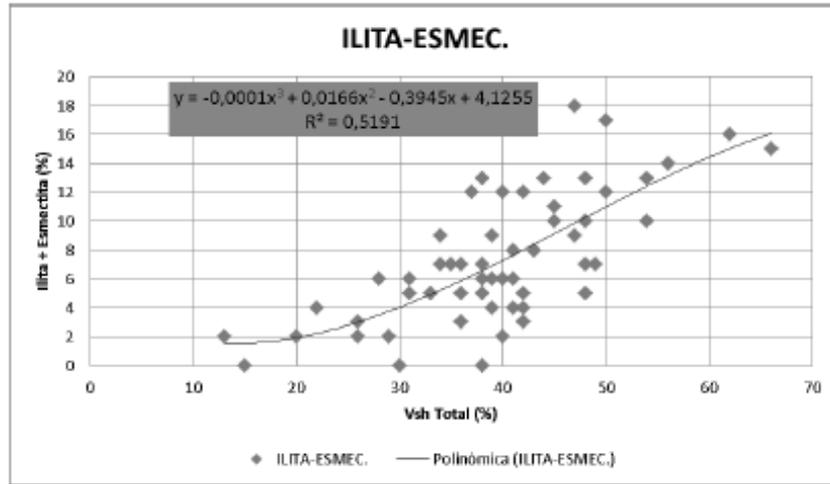


Ilustración 11. Gráfico de dispersión de la Iilita + Esmectita en función del Vsh del yacimiento.

Luego, se determinó la Covarianza y el coeficiente de Pearson de los resultados obtenidos en los DRX establecido por Peinado A. (1996), correspondiente a los tipos de arcilla presentes en el yacimiento con respecto al Vsh, mostrados en la tabla 3, arrojando valores consistentes en la dispersión (covarianza) de los datos por cada tipo de arcilla desde 50.56 para la caolinita como 5.419 para la clorita; la covarianza muestra una correspondencia directamente proporcional de los tipos de arcillas con referencia al vsh, es decir, si le Vsh sube,

la caolinita sube del mismo modo, si el Vsh baja, la caolinita baja igual.

Para el Coeficiente de Correlación de Pearson se obtuvo valores cercanos a 1 para la caolinita y la ilita + esmectita (0.8 y 0.7 respectivamente), lo que permite establecer una dependencia directamente proporcional al Vsh. Para la clorita y la ilita se presentan valores cercanos a cero pero positivos, lo que permite establecer que hay una dependencia moderada directamente proporcional al Vsh.

Tabla 3. Covarianza y coeficiente de correlación de pearson para los análisis de laboratorio DRX del yacimiento C-5-X-18.

Variables	Covarianza	Correlación de Pearson
Vsh / Caolinita	50,561	0,809
Vsh / Clorita	5,419	0,213
Vsh / Iilita	14,32	0,472
Vsh / Iilita + Esmectita	31,492	0,711

No se pudo realizar una comparación directa de los datos obtenidos de DRX con respecto a los valores resultantes del análisis de las gráficas de los registros especiales del pozo UD0731, debido a la inconsistencia de las respuestas de los tipos de arcillas presentes en el yacimiento C-5-X-18, por el efecto de los elementos pesados que afectaron el Pe. Los resultados de los DRX de los pozos vecinos, muestran que la caolinita es el tipo de arcilla predominante en el yacimiento, en cambio, para las cartas litológicas por medio del GR espectral y el factor Ilustracióneléctrico se muestra la

montmorillonita y arcillas mixtas como predominante en el yacimiento, esto se debe a las condiciones de perfilaje y el tipo de lodo, el cual, está influenciando el comportamiento de los tipos de arcilla presente en el pozo.

Determinación del modelo de volumen de arcilla del yacimiento C-5-X-18

Para definir el modelo de volumen de arcilla (Vsh), se tomaron en cuenta los análisis de las muestras de

canal (Difracción de Rayos X), los datos de perfiles del volumen total de contenido radiactivo del registro NGRS, donde se procede a determinar el índice de arcillosidad o el volumen de arcilla utilizando las ecuaciones de los diferentes modelos de arcillosidad indicado por Debasmita, M; Schatzinger, R; Cil, M & Jill, M (1998) , seleccionando como modelo a utilizar aquel que más se ajuste a los volúmenes de arcilla reportados por dicha data.

Se comparó el porcentaje de contenido de arcilla proporcionado por los análisis de laboratorio DRX con las diferentes curvas de volumen de arcilla (Vsh) proveniente de los perfiles de Rayos Gamma y/o Potencial Espontaneo, las mismas, fueron calculadas aplicando las siguientes correlaciones: lineal, Stieber (Ilustración 11), Clavier y Larionov Old Rock (Ilustración 12), estableciendo la correlación de Vsh de **Stieber** como la que mejor respuesta al momento de cotejar con los resultados establecidos en los resultados

previos, definiendo así el modelo de volumen de arcillosidad para el yacimiento C-5-X-18. La ecuación de Stieber expresa lo siguiente: $Vsh = (0.5 * IVsh) / (1.5 - IVsh)$.

Comportamiento multivariado del volumen de cada tipo de arcilla presente en el yacimiento C-5-X-18.

Se estableció el comportamiento multivariado del volumen de cada tipo de arcilla presente en el yacimiento C-5-X-18, a través de modelos matemáticos establecidos por Deutsch, C (1996). En esta parte de la investigación, se requiere manejar una serie de modelos matemáticos mediante el uso de la herramienta Microsoft Excel para representar el comportamiento de los tipos de arcilla presente en el yacimiento de interés. La aplicación de modelos matemáticos ayudó a establecer de manera armónica y representativa el comportamiento de las mismas, permitiendo constituir de manera lógica la distribución

de los tipos de arcilla en el ya

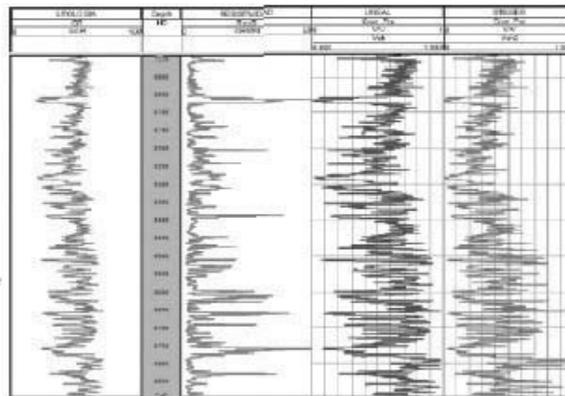


Ilustración 12. Correlaciones de Volumen de arcilla: lineal y Stieber.

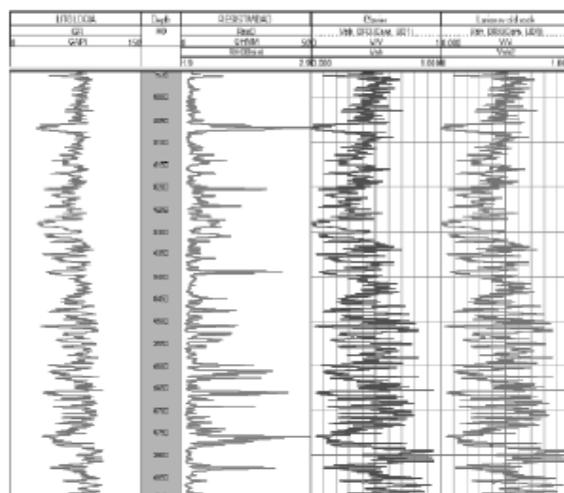


Ilustración 13. Correlaciones de Volumen de arcilla: Clavier y Larionov Old Rock.

Se estableció una línea de orientación norte – sur, con los pozos UD0067, UD0060, UD0063, UD0713, UD0718 y UD0078, con la finalidad de realizar un variograma experimental para cada tipo de arcilla,

considerando esta línea como la trayectoria más larga del yacimiento. La tabla 4 presenta los valores de entrada para el cálculo del variograma:

Tabla 4. Datos de entrada para los Variograma Experimentales del Yacimiento C-5-X-18.

Datos Experimentales					
CAOLINITA	CLORITA	ILITA	ILITA + ESMECTITA	TOTAL	
48.803	11.469	23.559	16.169	100	
46.017	2.7	30.808	23.175	100	
68.544	1.872	16.555	13.029	100	
50.67	4.263	26.212	18.855	100	
48.205	13.584	21.556	16.655	100	
59.379	9.208	22.783	8.63	100	

A continuación, la Ilustración de hoja de cálculo en Excel del variograma experimental para cada tipo de arcilla.

Para establecer el modelo matemático del comportamiento de cada tipo de arcilla, se generó un

variograma experimental (Gringarten E. & Deutch C.V. 1999) para cada uno, en la siguiente tabla se muestra los valores de la varianza de la caolinita, clorita, illita e illita + escmectita, respectivamente.

The screenshot displays an Excel spreadsheet titled 'Obtención de Variograma Experimental'. It includes the following sections:

- Obtención de Variograma Experimental:** A header section with a direction indicator and the formula for the variogram: $\gamma^2(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i+h) - z(x_i))^2$.
- Datos Experimentales:** A table with columns for POZO, CAOLINITA, CLORITA, ILITA, ILITA + ESMECTITA, and TOTAL. It lists data for six wells (UD0067, UD0060, UD0063, UD0713, UD0718, UD0078).
- Datos Resultados:** A table with columns for h, CAOLINITA, CLORITA, ILITA, ILITA + ESMECTITA, and TENDENCIA. It shows calculated values for h values 1 through 6.
- Variogramas Teóricos:** A table with columns for h, CAOLINITA, CLORITA, ILITA, ILITA + ESMECTITA, and TENDENCIA. It shows calculated values for h values 1 through 6.
- Graph:** A line graph showing the experimental variograms for each clay type and the total. The x-axis represents distance (h) and the y-axis represents variance. The curves show an increasing trend with distance, characteristic of a variogram.

Ilustración 14. Hoja de cálculo de excel de los variograma experimentales del yacimiento C-5-X-18.

Tabla 5. Datos para el variograma de la caolinita en el yacimiento C-5-X-18.

h1		h2		h3		h4		h5	
(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²								
-2,188	4,787344	-2,786	7,761796	-4,653	21,650409	-13,362	178,543044	-22,527	507,465729
-0,598	0,357604	-2,465	6,076225	-11,174	124,858276	-20,339	413,674921		
-1,867	3,485689	-10,576	111,851776	-19,741	389,707081				
-8,709	75,846681	-17,874	319,479876						
-9,165	83,997225								
Total	168,474543	Total	445,169673	Total	536,215766	Total	592,217965	Total	507,465729

Tabla 6. Datos para el variograma de la clorita en el yacimiento C-5-X-18.

Tabla 6. Datos para el variograma de la clorita en el yacimiento C-5-X-18.									
h1		h2		h3		h4		h5	
(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²
-5,001	25,010001	-6,228	38,787984	-7,004	49,056016	-9,657	93,257649	-14,253	203,148009
-1,227	1,505529	-2,003	4,012009	-4,656	21,678336	-9,252	85,599504		
-0,776	0,602176	-3,429	11,758041	-8,025	64,400625				
-2,653	7,038409	-7,249	52,548001						
-4,596	21,123216								
Total	55,279331	Total	107,106035	Total	135,134977	Total	178,857153	Total	203,148009

Tabla 7. Datos para el variograma de la illita en el yacimiento C-5-X-18.

Tabla 7. Datos para el variograma de la illita en el yacimiento C-5-X-18.									
h1		h2		h3		h4		h5	
(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²	(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²
-2,188	4,787344	-2,786	7,761796	-4,653	21,650409	-13,362	178,543044	-22,527	507,465729
-0,598	0,357604	-2,465	6,076225	-11,174	124,858276	-20,339	413,674921		
-1,867	3,485689	-10,576	111,851776	-19,741	389,707081				
-8,709	75,846681	-17,874	319,479876						
-9,165	83,997225								
Total	168,474543	Total	445,169673	Total	536,215766	Total	592,217965	Total	507,465729

Tabla 8. Datos para el variograma de la illita + esmectita en el yacimiento C-5-X-18

h1		h2		h3		h4		h5	
(Xi+h)-Xi	(z(Xi+h)-zXi) ²								
-4,399	19,351201	-7,539	56,836521	-8,025	64,400625	-10,225	104,550625	-14,545	211,557025
-3,14	9,8596	-3,626	13,147876	-5,826	33,942276	-10,146	102,941316		
-0,486	0,236196	-2,686	7,214596	-7,006	49,084036				
-2,2	4,84	-6,52	42,5104						
-4,32	18,6624								
Total	52,949397	Total	119,709393	Total	147,426937	Total	207,491941	Total	211,557025

Se desarrolló el Variograma Experimental expresado por: Gringarten E. & Deutch C.V. (1999), para cada tipo de arcilla, donde se establecieron los siguientes resultados expresados en la tabla 9:

Tabla 9. Datos generales del variograma de cada arcilla en el yacimiento C-5-X-18.

Resultados de los Variogramas				
h	CAOLINITA	CLORITA	ILITA	ILITA + ESMECTITA
1	16,847	3,717	3,775	5,295
2	55,646	14,893	9,406	14,964
3	89,369	36,266	16,515	24,571
4	148,054	52,641	34,047	51,873
5	253,733	68,585	66,736	105,779

En la siguiente Ilustración se presentan los variogramas experimentales para cada tipo de arcilla, elaborados en la presente investigación:

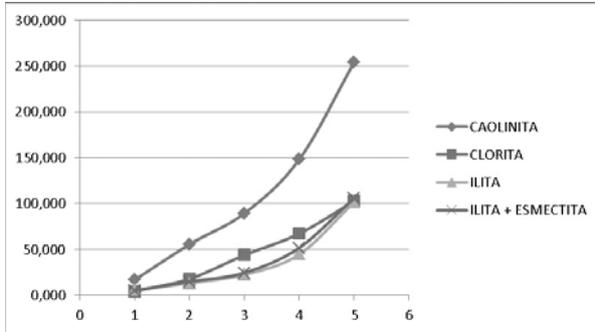


Ilustración 15. Gráfica de los Variogramas experimentales de los tipos de arcillas del yacimiento C-5-X-18.

Luego se procedió a determinar el modelo matemático de los tipos de arcilla y su volumen en el yacimiento C-5-X-18. En este caso se realizó la comparación con referencia a cada variograma experimental y los variograma teóricos, permitiendo observar que el que mejor se ajusta es el modelo de variograma potencial según Gringarten E. & Deutch C.V. (1999), la misma, tiene una capacidad de dispersión ilimitada, es decir, no tiene meseta; corresponde a un modelo monómico, que expresa algunos casos de fenómenos no estacionarios. Cuya ecuación se expresa a continuación:

$$\gamma(h) = |h|^p, \text{ donde } p \in [0, 2]$$

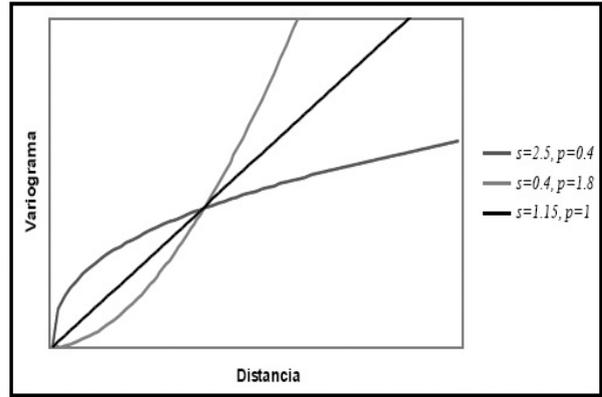


Ilustración 16. Variograma teórico potencial con referencia al modelo de distribución de arcillas del yacimiento C-5-X-18.

Establecido el modelo matemático como el variograma potencial, se procede a determinar los valores correspondientes al porcentaje de cada tipo de arcilla presente en el yacimiento en los pozos que no poseen datos de análisis de DRX de muestras de canal, esa estimación de dichos valores se obtiene mediante la aplicación de la metodología geoestadística de **kriging simple**, para este estudio se procedió a estimarlo con referencia a tres (03) pozos vecinos con datos de cada arcilla considerado por Journel, A (1985). A continuación se muestra el método de kriging simple con la aplicación del Variograma Teórico Potencial para la estimación del porcentaje de caolinita en el pozo UD0045:

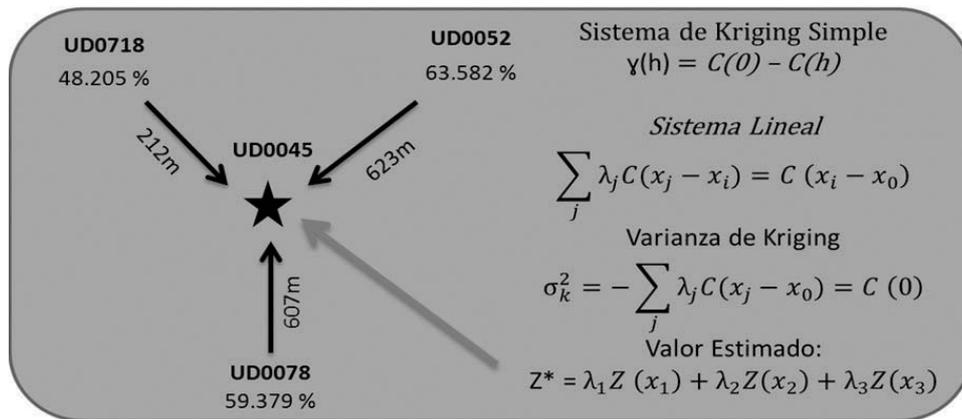


Ilustración 17. Metodología geoestadística de kriging simple con la aplicación del variograma teórico potencial para la estimación del porcentaje de caolinita en el pozo UD0045.

A continuación se muestra los datos asociados a los pozos sin información de tipos de arcillas, mostrando los valores obtenidos por kriging ordinario. En las Tablas 10, 11, 12 y 13 se observan las distribuciones de la Caolinita, Clorita, illita e illita + esmectita en el resto de los pozos.

Para finalizar la investigación se generó un modelo de distribución geoestadística de los tipos de arcillas

del yacimiento C-5-X-18, Campo Urdaneta Lama, Unidad de Producción Lagomar integrando datos de laboratorio y registros de campo. Donde se procedió a propagar el modelo matemático seleccionado en la parte anterior, mostrando un patrón homogéneo del comportamiento de los tipos de arcilla a lo largo y ancho del yacimiento, observando en las siguientes ilustraciones la distribución geoestadística de los tipos de arcilla presente en el mismo.

Tabla 10. Datos de la caolinita (%) presente en los pozos sin DRX del yacimiento C-5-X-18.

POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS	POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS
UD 45	UD0718	UD0078	UD0052		UD 97	UD0060	UD0063	UD0065	
59,552	212	607	623	DISTANCIA	56,882	547	1054	920	DISTANCIA
	48,205	59,379	63,582	%		46,01666	64,909	54,145	%
UD 53	UD0701	UD0713	UD0066		UD 131	UD0060	UD0067	UD0065	
56,292	265	276	612	DISTANCIA	49,588	3549	2690	3245	DISTANCIA
	49,37	50,67	61,824	%		46,01666	48,803	54,145	%
UD 54	UD0779	UD0807	UD0078		UDL 161	UD0066	UD0062	UD0065	
52,189	201	590	196	DISTANCIA	56,09	638	1056	1225	DISTANCIA
	51,615	49,996	59,379	%		61,824	54,881	54,145	%
UD 55	UD0060	UD0063	UD0065		UDL 167	UD0060	UD0062	UD0065	
56,483	612	1044	1023	DISTANCIA	50,345	616	571	20	DISTANCIA
	46,01666	64,909	54,145	%		46,01666	54,881	54,145	%
UD 56	UD0701	UD0713	UD0066		UD 168	UD0060	UD0067	UD0065	
56,398	241	267	594	DISTANCIA	49,792	2542	1651	2580	DISTANCIA
	49,37	50,67	61,824	%		46,01666	48,803	54,145	%
UD 57	UD0060	UD0063	UD0065		UD 482	UD0060	UD0067	UD0065	
56,21	691	1074	1114	DISTANCIA	50,001	2263	936	2446	DISTANCIA
	46,01666	64,909	54,145	%		46,01666	48,803	54,145	%
UD 58	UD0060	UD0063	UD0065		UD 541	UD0060	UD0063	UD0713	
55,901	1590	2095	1797	DISTANCIA	48,939	582	50	521	DISTANCIA
	46,01666	64,909	54,145	%		46,017	64,909	50,67	%
UD 64	UD0060	UD0067	UD0065		UD 546	UD0060	UD0063	UD0065	
50,03	3666	618	3760	DISTANCIA	56,531	622	1078	1044	DISTANCIA
	46,01666	48,803	54,145	%		46,017	64,909	54,145	%
UD 68	UD0060	UD0067	UD0065		UD 704	UD0052	UD0779	UD0718	
49,863	2633	1599	2761	DISTANCIA	53,055	281	293	523	DISTANCIA
	46,01666	48,803	54,145	%		63,582	51,615	48,205	%
UD 70	UD0060	UD0067	UD0065		UD 731	UD0701	UD0779	UD0718	
50,038	4703	606	4787	DISTANCIA	50,076	370	528	295	DISTANCIA
	46,01666	48,803	54,145	%		49,37	51,615	48,205	%
UD 86	UD0063	UD0062	UD0060						
53,709	333	303	531	DISTANCIA					
	64,909	54,881	46,01666	%					

Tabla 11. Datos de la clorita (%) presente en los pozos sin DRX del yacimiento C-5-X-18.

POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS	POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS
UD 45	UD0718	UD0078	UD0052		UD 97	UD0060	UD0063	UD0065	
7,902	212	607	623	DISTANCIA	6,932	547	1054	920	DISTANCIA
	13,584	9,208	4,697	%		7,251	6,946	6,725	%
UD 53	UD0701	UD0713	UD0066		UD 131	UD0060	UD0067	UD0065	
10,678	265	276	612	DISTANCIA	8,267	3549	2690	3245	DISTANCIA
	12,598	4,263	12,74	%		7,251	11,469	6,725	%
UD 54	UD0779	UD0807	UD0078		UDL 161	UD0066	UD0062	UD0065	
10,547	201	590	196	DISTANCIA	7,509	638	1056	1225	DISTANCIA
	10,231	11,1	9,208	%		12,74	5,26	6,725	%
UD 55	UD0060	UD0063	UD0065		UDL 167	UD0060	UD0062	UD0065	
6,931	612	1044	1023	DISTANCIA	6,3	616	571	20	DISTANCIA
	7,251	6,946	6,725	%		7,251	5,26	6,725	%
UD 56	UD0701	UD0713	UD0066		UD 168	UD0060	UD0067	UD0065	
10,655	241	267	594	DISTANCIA	8,079	2542	1651	2580	DISTANCIA
	12,598	4,263	12,74	%		7,251	11,469	6,725	%
UD 57	UD0060	UD0063	UD0065		UD 482	UD0060	UD0067	UD0065	
6,934	691	1074	1114	DISTANCIA	7,722	2263	936	2446	DISTANCIA
	7,251	6,946	6,725	%		7,251	11,469	6,725	%
UD 58	UD0060	UD0063	UD0065		UD 541	UD0060	UD0063	UD0713	
6,962	1590	2095	1797	DISTANCIA	5,888	582	50	521	DISTANCIA
	7,251	6,946	6,725	%		7,251	6,946	4,263	%
UD 64	UD0060	UD0067	UD0065		UD 546	UD0060	UD0063	UD0065	
7,329	3666	618	3760	DISTANCIA	6,931	622	1078	1044	DISTANCIA
	7,251	11,469	6,725	%		7,251	6,946	6,725	%
UD 68	UD0060	UD0067	UD0065		UD 704	UD0052	UD0779	UD0718	
8,008	2633	1599	2761	DISTANCIA	10,412	281	293	523	DISTANCIA
	7,251	11,469	6,725	%		4,697	10,231	13,584	%
UD 70	UD0060	UD0067	UD0065		UD 731	UD0701	UD0779	UD0718	
7,255	4703	606	4787	DISTANCIA	11,794	370	528	295	DISTANCIA
	7,251	11,469	6,725	%		12,598	10,231	13,584	%
UD 86	UD0063	UD0062	UD0060						
6,647	333	303	531	DISTANCIA					
	6,946	5,26	7,251	%					

Tabla 12. Datos de la illita (%) presente en los pozos sin DRX del Yacimiento C-5-X-18

POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS	POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS
UD 45	UD0718	UD0078	UD0052		UD 97	UD0060	UD0063	UD0065	
19,5	212	607	623	DISTANCIA	16,373	547	1054	920	DISTANCIA
	21,556	22,784	15,6	%		24,155	16,556	11,536	%
UD 53	UD0701	UD0713	UD0066		UD 131	UD0060	UD0067	UD0065	
17,307	265	276	612	DISTANCIA	19,668	3549	2690	3245	DISTANCIA
	17,291	26,212	13,297	%		24,155	23,559	11,536	%
UD 54	UD0779	UD0807	UD0078		UDL 161	UD0066	UD0062	UD0065	
16,49	201	590	196	DISTANCIA	12,293	638	1056	1225	DISTANCIA
	22,388	12,391	22,784	%		13,297	12,564	11,536	%
UD 55	UD0060	UD0063	UD0065		UDL 167	UD0060	UD0062	UD0065	
16,375	612	1044	1023	DISTANCIA	18,463	616	571	20	DISTANCIA
	24,155	16,556	11,536	%		24,155	12,564	11,536	%
UD 56	UD0701	UD0713	UD0066		UD 168	UD0060	UD0067	UD0065	
16,999	241	267	594	DISTANCIA	19,203	2542	1651	2580	DISTANCIA
	17,291	26,212	12,74	%		24,155	23,559	11,536	%
UD 57	UD0060	UD0063	UD0065		UD 482	UD0060	UD0067	UD0065	
16,437	691	1074	1114	DISTANCIA	18,588	2263	936	2446	DISTANCIA
	24,155	16,556	11,536	%		24,155	23,559	11,536	%
UD 58	UD0060	UD0063	UD0065		UD 541	UD0060	UD0063	UD0713	
17,114	1590	2095	1797	DISTANCIA	24,755	582	50	521	DISTANCIA
	24,155	16,556	11,536	%		24,155	16,556	26,212	%
UD 64	UD0060	UD0067	UD0065		UD 546	UD0060	UD0063	UD0065	
18,211	3666	618	3760	DISTANCIA	16,369	622	1078	1044	DISTANCIA
	24,155	23,559	11,536	%		24,155	16,556	11,536	%
UD 68	UD0060	UD0067	UD0065		UD 704	UD0052	UD0779	UD0718	
19,036	2633	1599	2761	DISTANCIA	20,253	281	293	523	DISTANCIA
	24,155	23,559	11,536	%		15,6	22,388	21,556	%
UD 70	UD0060	UD0067	UD0065		UD 731	UD0701	UD0779	UD0718	
18,136	4703	606	4787	DISTANCIA	20,602	370	528	295	DISTANCIA
	24,155	23,559	11,536	%		17,291	22,388	21,556	%
UD 86	UD0063	UD0062	UD0060						
18,977	333	303	531	DISTANCIA					
	16,556	12,564	24,155	%					

Tabla 13. Datos de la illita + esmectita (%) presente en los pozos sin DRX del Yacimiento C-5-X-18.

POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS	POZO	POZO 1	POZO 2	POZO 3	DATOS
UD 45	UD0718	UD0078	UD0052		UD 97	UD0060	UD0063	UD0065	
13,046	212	607	623	DISTANCIA	19,814	547	1054	920	DISTANCIA
	16,655	8,63	16,121	%		22,577	11,589	27,594	%
UD 53	UD0701	UD0713	UD0066		UD 131	UD0060	UD0067	UD0065	
15,724	265	276	612	DISTANCIA	22,476	3549	2690	3245	DISTANCIA
	20,74	18,855	12,139	%		22,577	16,169	27,594	%
UD 54	UD0779	UD0807	UD0078		UDL 161	UD0066	UD0062	UD0065	
20,773	201	590	196	DISTANCIA	24,108	638	1056	1225	DISTANCIA
	15,765	26,513	8,63	%		12,139	27,295	27,594	%
UD 55	UD0060	UD0063	UD0065		UDL 167	UD0060	UD0062	UD0065	
20,211	612	1044	1023	DISTANCIA	24,892	616	571	20	DISTANCIA
	22,577	11,589	27,594	%		22,577	27,295	27,594	%
UD 56	UD0701	UD0713	UD0066		UD 168	UD0060	UD0067	UD0065	
15,647	241	267	594	DISTANCIA	22,926	2542	1651	2580	DISTANCIA
	20,74	18,855	12,139	%		22,577	16,169	27,594	%
UD 57	UD0060	UD0063	UD0065		UD 482	UD0060	UD0067	UD0065	
20,419	691	1074	1114	DISTANCIA	23,689	2263	936	2446	DISTANCIA
	22,577	11,589	27,594	%		22,577	16,169	27,594	%
UD 58	UD0060	UD0063	UD0065		UD 541	UD0060	UD0063	UD0713	
20,023	1590	2095	1797	DISTANCIA	20,419	582	50	521	DISTANCIA
	22,577	11,589	27,594	%		22,577	11,589	18,855	%
UD 64	UD0060	UD0067	UD0065		UD 546	UD0060	UD0063	UD0065	
24,43	3666	618	3760	DISTANCIA	20,169	622	1078	1044	DISTANCIA
	22,577	16,169	27,594	%		22,577	11,589	27,594	%
UD 68	UD0060	UD0067	UD0065		UD 704	UD0052	UD0779	UD0718	
23,093	2633	1599	2761	DISTANCIA	16,281	281	293	523	DISTANCIA
	22,577	16,169	27,594	%		16,121	15,765	16,655	%
UD 70	UD0060	UD0067	UD0065		UD 731	UD0701	UD0779	UD0718	
24,571	4703	606	4787	DISTANCIA	17,528	370	528	295	DISTANCIA
	22,577	16,169	27,594	%		20,74	15,765	16,655	%
UD 86	UD0063	UD0062	UD0060						
20,667	333	303	531	DISTANCIA					
	11,589	27,295	22,577	%					

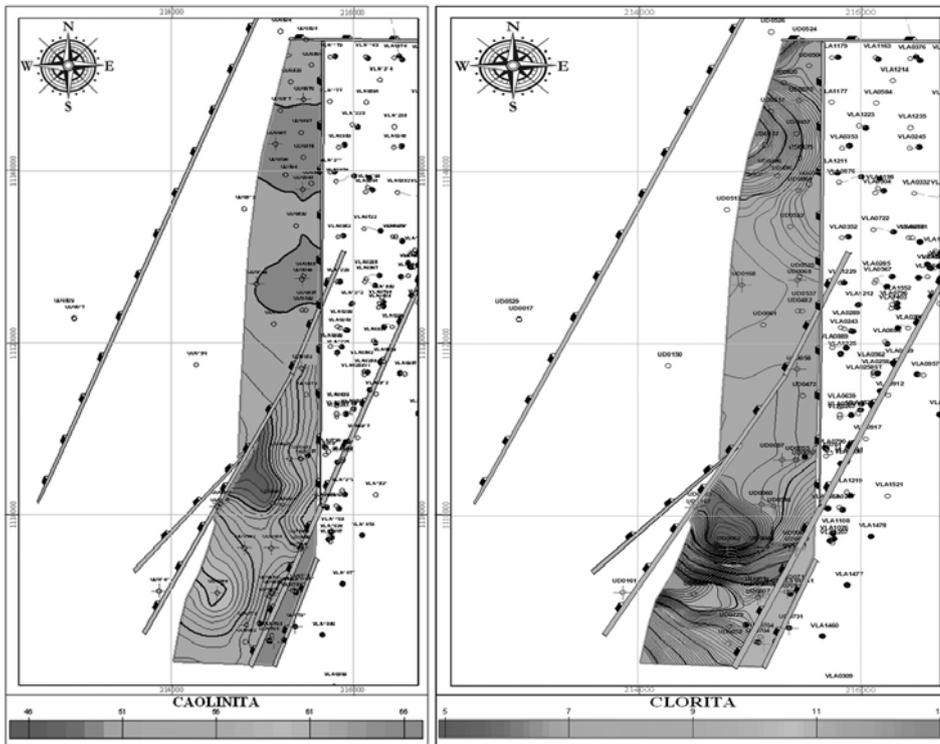


Ilustración 18. Mapas de distribución de Caolinita y Clorita en el yacimiento C-5-X-18.

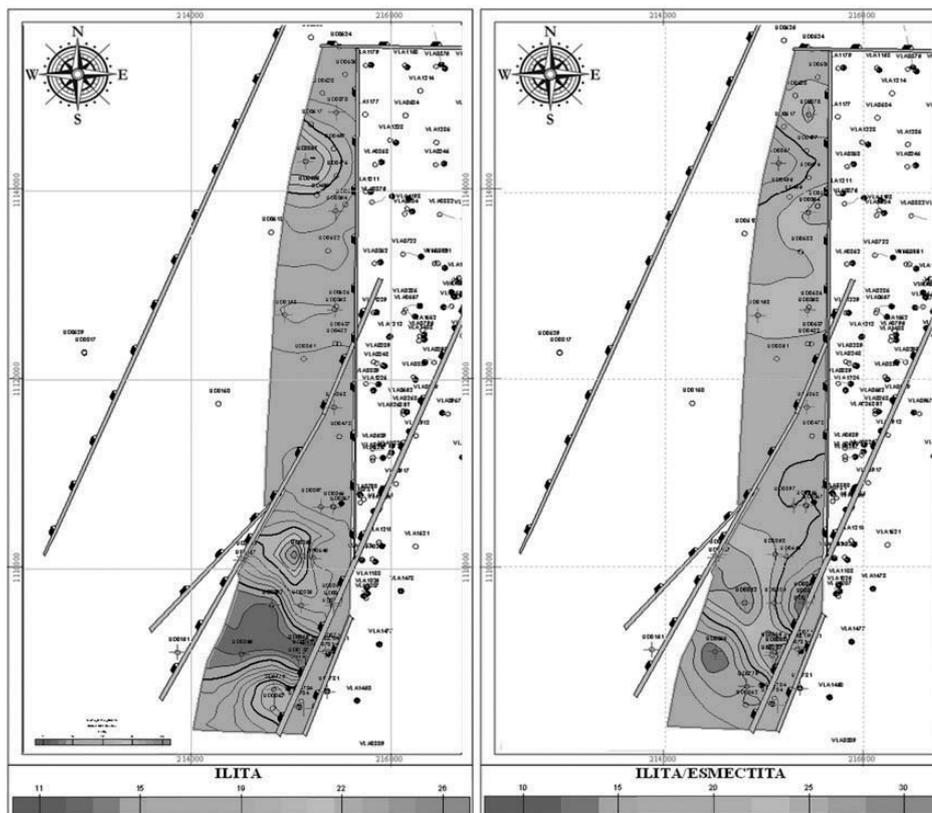


Ilustración 19. Mapas de distribución de Caolinita y Clorita en el yacimiento C-5-X-18.

Una vez plasmados los mapas del comportamiento de cada uno de los tipos de arcillas, se puede establecer que el modelo de distribución de los mismos en el yacimiento C-5-X-18, obtenido mediante esta investigación expresa excelentes resultados en cuanto al comportamiento de los cuatro (04) tipos de arcilla principales en el área de estudio.

Conclusiones y Recomendaciones

En función al desarrollo de un modelo de distribución geoestadística para los tipos de arcilla en esta investigación, se puede concluir que el método de estimación de kriging, utilizando el modelo del variograma teórico Potencial, para el cálculo de los valores porcentuales de los tipos de arcilla en los pozos sin datos con referencia a tres pozos cercano arrojo excelente resultados con una distribución de las mismas.

Enmarcado dentro de las seis etapas de esta investigación se puede establecer las siguientes conclusiones:

- El análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio de DRX aplicado a las 57 muestras correspondiente a los trece (13) pozos con ripios muestran como la caolinita es la arcilla predominante con 53.73%, así como también, se determinó que la illita esta presente con un 17.94%, la illita + esmectita con 19.43% y la clorita con 8.88%.
- Se identificaron 34 pozos con registros convencionales y un pozo (UD0731) con Gamma Ray Spectral, permitiendo realizar un análisis del volumen total de arcilla presente en el yacimiento, por otra parte, se intentó determinar el tipo de arcilla predominante en el reservorio mediante las cartas de interpretación de litología de Schlumberger, la cual, fue descartada por la influencia negativa al Pe por los elementos pesados presentes en el lodo de perforación.
- Se obtuvo la tendencia de cada tipo de arcilla con respecto al volumen total de arcilla, estableciendo poca referencia de ajuste.
- Los resultados de la covarianza y coeficiente de correlación de Pearson para los cuatro tipos de arcillas, determinaron el mejor comportamiento experimental para la caolinita, obteniendo el

segundo mejor comportando la illita + esmectita presentes en el yacimiento C-5-X-18.

- Se estableció el comportamiento multivariado de los tipos de arcilla por medio de variogramas experimentales, arrojando un comportamiento similar a un modelo Potencial de los Variogramas Teóricos, obteniendo buena correspondencia de los datos de cada uno de ellos con referencia a cada tipo de arcilla presente en el yacimiento.
- Se aplicó el método de estimación de kriging, utilizando el modelo del variograma teórico Potencial, para el cálculo de los valores porcentuales de los tipos de arcilla en los pozos sin datos con referencia a tres pozos cercanos.
- Se generaron los mapas de distribución de los tipos de arcillas, arrojando consistencia en los datos obtenidos por los diferentes métodos.

Por otra parte, la investigación permite establecer las siguientes recomendaciones:

- Realizar una toma de registros mineralógicos y Gamma Ray Espectral en el yacimiento C-5-X-18, en pozos nuevos, para seguir corroborando los resultados obtenidos en esta investigación.
- Aplicar esta metodología en otros yacimientos.
- Aplicar otro método de estimación geoestadística para comparar resultados con esta investigación.
- Realizar estimaciones matriciales estableciendo una mezcla con inhibidores de arcilla considerando el porcentaje de illita presente en el yacimiento, así como también, la ausencia de HCl, para evitar la precipitación ferrosa de la clorita.
- Realizar un estudio de variograma experimental de forma vertical, con la finalidad de correlacionar el comportamiento de los tipos de arcillas con las unidades de flujo en el yacimiento C-5-X-18

Referencias Bibliográficas

- Brindley, G & Brown, G (1980). **“Crystal structure of minerals and their X-ray identification.** Society Mineralogical, London, 2.58 – 265 pp.

Deutsch, C (1996). **“Geostatistical Reservoir Modeling Accounting for Precision and Scale of Seismic Data”**. SPE 36497, Denver, Colorado, 6 p.

Debasmita, M; Schatzinger, R; Cil, M & Jill, M (1998). **“An Assessment of Lateral Variability of Geological Parameters using Modal and Geostatistical Analysis of Outcrop Analog”**. SPE 49280, New Orleans, Louisiana, 3 p.

Fertl, W (1988). **“Determination of Volume, Type, and Distribution Modes of Clay Minerals from Well Logging Data”**. Paper publicado por Atlas Wireline Services, Western Atlas International, Inc., Houston, Texas (SPE: 17145), 5 p.

Gringarten E. & Deutch C.V. (1999) **“Methodology for Variogram Interpretation and Modeling for Improved Reservoir Characterization”**, University of Alberta, paper SPE 5654, 4 p.

Journel, A (1985). **“Constrained Interpolation and Qualitative Information – The Soft Kriging Approach”**, 53 – 75 pp.

Peinado A. (1996), **“Geoestadística Básica»**, CIED, Maracaibo, Apéndice A, 12 - 18 p.

Schlunberger (2012) **“Log Interpretation of Litology”**. Texas, 12 – 17 pp.

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2019

Fecha de aceptación: 28 de octubre de 2020
