

**ESTUDIO PILOTO DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA INORGÁNICA
MEDIANTE LA TÉCNICA EDS Y SU RELACIÓN CON LAS UNIDADES
ESTRATIGRÁFICAS DEFINIDAS EN UN POZO DEL NORTE DE COLOMBIA**

KATHERINE FROHARD RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO PILOTO DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA INORGÁNICA
MEDIANTE LA TÉCNICA EDS Y SU RELACIÓN CON LAS UNIDADES
ESTRATIGRÁFICAS DEFINIDAS EN UN POZO DEL NORTE DE COLOMBIA**

KATHERINE FROHARD RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Geóloga

Director

**VÍCTOR MANUEL CABALLERO ORTÍZ
M.Sc. en Geología**

Co-Directores

**GUILLERMO RODRÍGUEZ FORERO
M.Sc. en Geología y Geofísica**

**FREDDY MAURICIO NIÑO RODRÍGUEZ
M.Sc. en Geología y Geofísica de reservorios**

Tutor

**DAVID ALFONSO SERRANO FERREIRA
Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a los geólogos Víctor Caballero y Guillermo Rodríguez, quienes fueron pilares fundamentales en el desarrollo de mi tesis; a ellos gracias por el apoyo incondicional, la orientación, los consejos, y por aportar en mi formación profesional y personal.

Gracias a todos aquellos funcionarios del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) que siempre estuvieron dispuestos a asesorarme y resolver las dudas presentadas durante la elaboración del proyecto.

Mi agradecimiento al Profesor José Antonio Henao y al Laboratorio de Rayos X - UIS (Guatigüará), quienes patrocinaron y facilitaron los análisis DRX presentes. A todos los docentes que marcaron cada etapa de mi camino universitario y me impulsaron en el desarrollo de mi formación como geóloga.

A mis padres, por ser mi motor y guiarme en este camino llamado vida. A Oscar, por su gran apoyo y motivación en el transcurrir de mi carrera profesional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	21
2. JUSTIFICACIÓN	22
3. OBJETIVOS	24
3.1 OBJETIVO GENERAL	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4. MARCO TEÓRICO	25
4.1 APLICACIÓN DE LA GEOQUÍMICA INORGÁNICA EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA SUCESIÓN DE ROCAS SEDIMENTARIAS	25
4.1.1 Procedencia	28
4.1.2 Paleoclima	40
4.2 ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE RAYOS-X (EDS)	51
4.2.1 Principio físico general de la EDS	52
4.2.2 Consideraciones	55
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS APLICADOS EN GEOLOGÍA	57
4.3.1 Coeficiente de correlación de Pearson	57
4.3.2 Análisis clúster	58
4.3.3 Análisis de componentes principales (PCA)	59
5. ANTECEDENTES	61
5.1 MARCO GEOLÓGICO	61
5.1.1 Configuración tectónica del sector NW de Colombia	61
5.1.2 Tectonoestratigrafía	65

5.1.3 Estratigrafía.....	66
5.2 BIOESTRATIGRAFÍA	70
5.2.1 Paleoambiente	70
5.3 PETROGRAFÍA	71
5.3.1 Zona petrográfica C: (3719 - 3795 m).....	71
5.3.2 Zona petrográfica B: (3807 - 4152 m).....	71
5.3.3 Zona petrográfica A: (5205 – 5844 m)	72
7. METODOLOGÍA	86
7.1 PREPARATIVA DE LAS MUESTRAS	88
7.1.1 Toma de muestras	88
7.1.2 Lavado y secado.....	89
7.1.3 Tamizaje y picado	90
7.1.4 Pulverizado	91
7.2 PROCESAMIENTO QUÍMICO DE LAS MUESTRAS	92
7.2.1 Remoción de carbonatos	92
7.2.2 Remoción de silicatos	94
7.2.3 Separación del material orgánico e inorgánico	95
7.2.4 Secado y pulverizado.....	97
7.3 ADQUISICIÓN DE LOS DATOS MEDIANTE LA TÉCNICA ANALÍTICA EDS.....	97
7.3.1 Montaje de la muestra en pastilla	97
7.3.2 Lectura de elementos químicos	98
7.4 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL EQUIPO.....	115
7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	118
8. RESULTADOS.....	139
8.1 DESCRIPCIÓN DE LAS QUIMIOFACIES	139
8.2 DESCRIPCIÓN DE LA MATRIZ DE CORRELACIÓN	143
8.3 DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	144
9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	145
9.1. MINERALOGÍA.....	145

9.2. CAMBIOS EN LA PROVENIENCIA: PALEOCLIMA DEL ÁREA FUENTE Y APORTE DE MATERIAL TERRÍGENO	150
9.3. INTEGRACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS.....	152
10. CONCLUSIONES	154
11. RECOMENDACIONES.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	159
ANEXOS.....	168

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama binario construido para entender la relación elemento-elemento	32
Figura 2. Diagrama binario construido para mostrar la relación colinear entre elementos.	35
Figura 3. Cross plot de Eigenvector a partir de un análisis de componentes principales (PCA) de todas las muestras de arcillolitas	37
Figura 4. Comparación de elementos seleccionados y proporciones de elementos con datos mineralógicos adquiridos usando análisis DRX.....	39
Figura 5. Gráfica mostrando las variaciones Eh y ph de aguas en ambientes naturales	42
Figura 6. La estabilidad relativa de minerales comunes de silicato bajo condiciones de meteorización.....	45
Figura 7. Definición geoquímica de la máxima superficie de inundación. Altos valores de materia orgánica = alto Mo y U, bajo aporte de detritos terrestres = bajo Zr. La relación Th/U define claramente la MFS	51
Figura 8. Componentes de un sistema de espectrometría de energía dispersiva de rayos-X	53
Figura 9. Generación de algunos de los rayos-X más usuales.....	54
Figura 10. Espectro de rayos-X de energía dispersiva mostrando los picos de los elementos principales encontrados en la muestra	55
Figura 11. Una sección transversal en sentido NW-SE y un esquema paleogeográfico indican la evolución estructural del NW de Colombia desde el Cretácico Superior hasta el presente	62

Figura 12. Configuración general del sector NW de Colombia. El Cinturón del Sinú se resalta en el polígono rojo	64
Figura 13. Marco cronoestratigráfico del Cinturón de Sinú, y su equivalencia con las secuencias definidas. Se incluye a manera general la litología predominante en cada unidad/formación.....	68
Figura 14. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EX con profundidad 2673 m.....	73
Figura 15. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EZ con profundidad 2859 m.....	74
Figura 16. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FG con profundidad 3033 m.....	75
Figura 17. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FB con profundidad 3177 m.....	76
Figura 18. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FA con profundidad 3393 m.....	77
Figura 19. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EW con profundidad 3855 m.....	78
Figura 20. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EY con profundidad 4050 m.....	79
Figura 21. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FF con profundidad 4305 m.....	80
Figura 22. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FE con profundidad 4536 m.....	81
Figura 23. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EV con profundidad 4929 m.....	82
Figura 24. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FD con profundidad 5199 m.....	83
Figura 25. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FH con profundidad 5619 m.....	84

Figura 26. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FC con profundidad 5859 m.....	85
Figura 27. Esquema correspondiente a las etapas de la metodología aplicada. ...	87
Figura 28. Etapa de toma de muestras del Pozo-1. Litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo.....	89
Figura 29. Proceso de lavado (A) y secado (B) de las muestras seleccionadas del Pozo-1.	90
Figura 30. Proceso de tamizaje (A) y picking (B) de las muestras seleccionadas del Pozo-1.	91
Figura 31. Proceso de pulverizado de las muestras seleccionadas del Pozo-1. ...	92
Figura 32. Proceso de remoción de carbonatos de las muestras seleccionadas del Pozo-1.	93
Figura 33. Proceso de remoción de silicatos de las muestras seleccionadas del Pozo-1.	94
Figura 34. A. $ZnCl_2$ (cloruro de zinc de 2.0 g/ml) en una proporción 3:1. B. Mezcla homogénea sin formación de grumos. C. Centrifugado por 20 minutos a 2600 rpm. D. Fraccionamiento de la muestra por efectos de diferencia de densidades, separando la materia orgánica (anillo en la parte superior) de la inorgánica. E. Lavado con agua destilada para eliminar el $ZnCl_2$	96
Figura 35. Muestras dispuestas en cajas Petri para llevar al horno.....	97
Figura 36. Instrumentación para la elaboración de las pastillas y su respectivo almacenamiento.....	98
Figura 37. 1. Microscopio petrográfico Leica-DM4500 P LED. 2. Sonda CL5 EDX. 3. Sistema de activación del cañón de electrones. 4. Unidad de control - Sistema óptico de catodoluminiscencia CL8200 MK5-2. 5. Bomba de vacío EDWARDS. 6. Cámara de vacío. 7. Cañón de electrones.....	99
Figura 38. Postura en la platina de las pastillas contenidas en la lámina.	100
Figura 39. Condiciones requeridas de vacío y de la válvula para poder accionar el switch kV.....	101
Figura 40. Pasos para la activación del cañón de electrones.	102

Figura 41. Software EPXA (CrossRoads Scientific).....	102
Figura 42. 1. Menú de opciones. 2. Icono de adquisición del espectro. 3. Parámetros de medición.	103
Figura 43. Selección de los elementos mayores en la pestaña “Element ID”	104
Figura 44. Selección de los elementos mayores en la pestaña “Element ID”	105
Figura 45. Generación del espectro.....	106
Figura 46. Pasos de ajuste del espectro.....	107
Figura 47. Espectro ajustado.	107
Figura 48. Mensaje indicador de espectro ajustado.....	108
Figura 49. Detección de elementos según elección e identificación automática..	109
Figura 50. Columna “Line” para cambios de los niveles de energía del elemento.	110
Figura 51. Paso de eliminación del ruido en el espectro.....	111
Figura 52. Espectro adecuado para cuantificación de componentes.....	111
Figura 53. Mensaje indicando que el cálculo de las intensidades en el espectro se ha realizado.	112
Figura 54. Cuantificación de las concentraciones de cada elemento identificado en la muestra.	113
Figura 55. Espectro final obtenido de una muestra de lodolita.	113
Figura 56. Datos en formato txt. Arrojados por el equipo.....	114
Figura 57. A. Datos del material de referencia BIR-1, avalados por el USGS mediante la técnica ICP-OES. B. Datos del material de referencia BIR-1 tomados en el equipo EDS.	116
Figura 58. A. Gráfico de dispersión de los datos mayores reportados por la ICP-OES y la EDS. B. Gráfico de correlación entre los datos de la técnica ICP-OES y la EDS	117
Figura 59. A. Datos del material de referencia BIR-1, avalados por el USGS mediante la técnica ICP-MS. B. Datos del material de referencia BIR-1 tomados en el equipo EDS.	117

Figura 60. A. Gráfico de dispersión de los datos mayores reportados por la ICP-OES y la EDS. B. Gráfico de correlación entre los datos de la técnica ICP-OES y la EDS	118
Figura 61. Interfaz gráfica del software R (R STUDIO).....	121
Figura 62. Curvas de tendencia de las concentraciones químicas de elementos mayores para el Pozo-1.....	122
Figura 63. Curvas de tendencia de relaciones químicas del Pozo-1.	123
Figura 64. Matriz de correlación de los elementos mayores del Pozo-1.....	125
Figura 65. Clúster de las muestras analizadas en el Pozo-1.....	127
Figura 66. Quimiofacies identificadas en el Pozo-1.	130
Figura 67. División de las curvas de tendencia de relaciones químicas, utilizando los intervalos de las quimiofacies de la figura 72.....	131
Figura 68. Diagrama PCA para los elementos mayores del Pozo-1.....	134
Figura 69. Delimitación de las quimiofacies en el diagrama de análisis de componentes principales (PCA).....	134
Figura 70. Diagrama de carga sobre el componente 1 (Calcio).....	137
Figura 71. Diagrama de carga sobre el componente 2 (Manganeso).	137
Figura 72. Diagrama de carga sobre el componente 3 (Fósforo).....	138
Figura 73. Diagrama de carga sobre el componente 4 (Sodio).....	138
Figura 74. Integración de los estudios realizados en el Pozo-1.....	135

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Escala de valores para el coeficiente de correlación de Pearson	58
Tabla 2. Datos de elementos mayores (wt%) tomados a partir de la técnica EDS.	119
Tabla 3. Datos de elementos mayores para la profundidad 2439 m a partir de EDS.	120
Tabla 4. Matriz con los valores del coeficiente de correlación de Pearson.....	124
Tabla 5. Datos de elementos mayores (wt%) transformados por Centered Log- Ratio.	133
Tabla 6. 1. Tabla resumen con los eigenvalues y los porcentajes de varianza para cada componente principal en términos de la matriz de varianza. 2. Tabla resumen con los eigenvalues y los porcentajes de varianza para cada componente principal en términos de la matriz de correlación.	136
Tabla 7. Tabla con las cargas elementales de los componentes principales y su respectiva identificación (color rojo) en términos de las variables (elementos químicos).	136

LISTA DE ANEXOS

Los anexos relacionados a continuación se encuentran adjuntos en medio magnético.

ANEXO A. Informe de resultados difracción de rayos X (DRX)

ANEXO B. Datos de elementos mayores, menores, traza y REE del Pozo-1

ANEXO C. Datos de elementos mayores del Pozo-1

ANEXO D. Relaciones químicas del Pozo-1

ANEXO E. Integración de estudios realizados en el Pozo-1

ABREVIATURAS DE ELEMENTOS QUÍMICOS USADOS EN EL DOCUMENTO

Al	Aluminio	Ni	Níquel
Ba	Bario	P	Fósforo
Be	Berilio	Rb	Rubidio
Ca	Calcio	S	Azufre
Cd	Cadmio	Sc	Escandio
Ce	Cerio	Si	Silicio
Co	Cobalto	Sn	Estaño
Cr	Cromo	Sr	Estroncio
Cs	Cesio	Ta	Tántalo
Cu	Cobre	Th	Torio
Eu	Europio	Ti	Titanio
Fe	Hierro	U	Uranio
Ga	Galio	V	Vanadio
Hf	Hafnio	W	Wolframio
K	Potasio	Y	Itrio
La	Lantano	Yb	terbio
Mg	Magnesio	Zn	Zinc
Mn	Manganeso	Zr	Circonio
Mo	Molibdeno	HREE	High Rare Earth Elements
Na	Sodio	LREE	Light Rare Earth Elements
Nb	Niobio	REE	Rare Earth Elements

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO PILOTO DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA INORGÁNICA MEDIANTE LA TÉCNICA EDS Y SU RELACIÓN CON LAS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DEFINIDAS EN UN POZO DEL NORTE DE COLOMBIA*

AUTOR: KATHERINE FROHARD RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVE: Geoquímica inorgánica, Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos-X (EDS), Elementos mayores, Cuenca Sinú de Colombia.

DESCRIPCIÓN:

En la exploración de hidrocarburos se adquiere una gran cantidad de información que permite entender la geología del área explorada. Sin embargo, la resolución de la misma está limitada por factores como la complejidad estructural, estratigráfica, entre otros. Por esta razón, siempre será valioso tener información adicional que se integre con datos previos para mejorar los resultados. Basado en esto, se realizó un estudio piloto de geoquímica inorgánica utilizando la técnica de Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) en un pozo del Norte de Colombia, como una herramienta de apoyo adicional para la definición de unidades estratigráficas. Se espera que, por medio de la cuantificación de la composición química a lo largo de la columna estratigráfica del pozo, se puedan identificar variaciones que permitan diferenciar unidades de roca.

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en cuatro etapas, donde fue necesario primero la preparativa de las muestras, seguido de un procesamiento químico, la adquisición de los datos mediante la técnica EDS y por último un análisis estadístico multivariante.

Este estudio permitió sugerir características del área fuente como el paleoclima, aportes de material terrígeno, y contenidos mineralógicos del sedimento. Así mismo se plantea como un proxy en la definición de las unidades estratigráficas comprendidas en el Pozo-1 y su integración con otros estudios como petrografía, bioestratigrafía y difracción de rayos X.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: MSc. Víctor Manuel Caballero Ortiz. Co-Directores: MSc. Guillermo Rodríguez Forero, MSc. Freddy Mauricio Niño Rodríguez. Tutor: David Alfonso Serrano Ferreira.

ABSTRACT

TITLE: PILOT PROJECT OF INORGANIC GEOCHEMISTRY CHARACTERIZATION USING EDS TECHNIQUE AND ITS RELATION WITH THE STRATIGRAPHIC UNITS DEFINED IN A WELL IN NORTHERN COLOMBIA *

AUTHOR: KATHERINE FROHARD RODRÍGUEZ**

KEYWORDS: Inorganic geochemistry, Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS), Major elements, Sinú Basin of Colombia.

DESCRIPTION:

In the hydrocarbon exploration, much of the information is acquired in order to understand the geology of the prospective area. However, its resolution is limited by structural and stratigraphic complexities as well as many factors. For this reason, it will always be valuable to acquire additional information that integrates with previous data in order to improve the results. Based on this, a pilot study of inorganic geochemistry using the Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) technique was carried out in a well in Northern Colombia as an additional tool for stratigraphic units definition. It is expected that, through the quantification of chemical composition along the stratigraphic column of the well, to identify variations in the sediment that allow differentiating rock units.

The development of this work was carried out in four stages, which consisted of preparation of the samples, chemical processing, acquisition of the data through the EDS technique and finally, analysis of multivariate data.

This study allowed the suggestion of characteristics of the source area as the paleoclimate, as well as contributions of terrigenous material, and mineralogical contents of the sediment. It is also proposed as a proxy in the definition of the stratigraphic units included in the Well-1 and its integration with other studies such as petrography, biostratigraphy and X-ray diffraction.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-chemical engineering. Geology School. Director: MSc. Víctor Manuel Caballero Ortiz. Co-Directors: MSc. Guillermo Rodríguez Forero, MSc. Freddy Mauricio Niño Rodríguez. Tutor: David Alfonso Serrano Ferreira.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Sinú es una cuenca de exploración frontera de hidrocarburos en Colombia, esto lógicamente implica que la información disponible sea escasa y la densidad de datos sea baja. Se caracteriza por su complejidad en relación a su configuración estructural y la variación lateral de facies, lo que es reflejado también en la definición de unidades estratigráficas.

Autores como Alfaro y Holz (2014)¹ exponen diversas razones por las cuales aumenta la confusión en la comprensión de la Cuenca Sinú: la existencia de estudios dispersos y puntuales, las interpretaciones basadas solamente en características litoestratigráficas, la ausencia de integración de un rango de datos con enfoque local a regional y la discrepancia de diferentes fuentes en la interpretación de un origen alóctono o autóctono de la Placa Caribe. Adicionalmente, a pesar de haberse incrementado la perforación de pozos exploratorios en dicha Cuenca, la mayoría de los estudios son de propiedad y los resultados permanecen inéditos por cuestiones de confidencialidad.

El presente proyecto hace referencia a la aplicación de la geoquímica inorgánica mediante la implementación de la técnica EDS, como una herramienta de apoyo adicional para la definición de unidades estratigráficas y su caracterización, en donde se espera que, por medio de la cuantificación sistemática de elementos químicos (elementos mayores, menores y traza) a lo largo de la columna estratigráfica del pozo, se puedan identificar cambios en la composición química del sedimento que permitan diferenciar unidades de roca (unidades geoquímicas), de tal forma que las tendencias y los cambios que se definan puedan servir como

¹ ALFARO, Esteban; HOLZ, Michael. Review of the chronostratigraphic charts in the Sinú-San Jacinto basin based on new seismic stratigraphic interpretations. ELSEVIER. 2014. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981114001151>

otra aproximación y así complementar las técnicas y estudios geológicos ya aplicados al Pozo de interés.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la cuenca Sinú se encuentra el Pozo caso de estudio, el cual cuenta con caracterizaciones estratigráficas realizadas a partir de diferentes proxies tales como proveniencia U-Pb y bioestratigrafía. Sin embargo, el aporte bioestratigráfico se ve afectado por especies con un rango estratigráfico amplio y presencia de organismos fósiles re TRABAJADOS; las dataciones U-Pb detríticas a la base de la columna del Pozo, contrastan con las edades sugeridas por la bioestratigrafía; esto hace que la definición de unidades estratigráficas hasta ahora tenga poca resolución temporal y estratigráfica.

1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Puede una caracterización geoquímica inorgánica de una sucesión de rocas sedimentarias, definir unidades estratigráficas más detalladas o comparables con las que son definidas mediante otras técnicas (bioestratigrafía, dataciones radiométricas, petrografía) en un Pozo del sector Norte de Colombia?

2. JUSTIFICACIÓN

En una secuencia sedimentaria la constitución elemental de los sedimentos es altamente variable debido a la composición de las rocas en el área de procedencia, facies sedimentarias analizadas, paleoclima y diagénesis. Incluso en sucesiones de facies aparentemente homogéneas, la geoquímica de roca total puede contener contrastes que permiten su diferenciación en unidades de roca.²

En los últimos años, la geoquímica de rocas sedimentarias ha experimentado un amplio desarrollo, consecuencia directa del gran avance de técnicas analíticas como la Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos-X (EDS). Dicha técnica permite una comprensión de la distribución elemental en los sedimentos y rocas, involucrando las variaciones temporales de atributos químicos a lo largo de una secuencia sedimentaria.³

Según lo mencionado anteriormente, se propone el uso de la geoquímica inorgánica mediante la implementación de la técnica EDS, en donde se espera que, por medio de la cuantificación sistemática de elementos químicos a lo largo de la columna estratigráfica del pozo, se puedan identificar cambios en la composición química del sedimento que permitan diferenciar unidades de roca (unidades geoquímicas inorgánicas) de tal forma que las tendencias y los cambios que se definan puedan servir como otra aproximación que mejore la definición de

² PEARCE, Tim; MACLEAN, Duncan; MARTIN, John; RATCLIFFE, Ken; WRAY, David. A whole-rock geochemical approach to the recognition and correlation of "marine bands". SEPM Special Publication N° 94. 2010, 221-238 p. ISBN 978-1-56576-199-5. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257605021_A_Whole-Rock_Geochemical_Approach_to_the_Recognition_and_Correlation_of_Marine_Bands

³ MÉNDEZ, Adriana; SALAS, Maren; GUTIÉRREZ, José V.; MARTÍNEZ, Manuel. Quimioestratigrafía de la Formación Pecaya (Oligoceno), noroeste de Venezuela: proveniencia y condiciones redox. 2005, 2 p. Disponible en: <http://www.coordinv.ciens.ucv.ve/investigacion/genci/sitios/10/archivos/Q7A-013.pdf>

las unidades estratigráficas y así complementar las técnicas y estudios geológicos ya aplicados al Pozo de interés.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una caracterización geoquímica inorgánica para identificar eventos, ciclos o unidades químicas particulares y relacionarlas con otras unidades estratigráficas ya definidas (bioestratigráficas, litoestratigráficas) en la secuencia sedimentaria del Pozo-1.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir datos de composición química elemental de los sedimentos en el Pozo-1 mediante la técnica analítica EDS.
- Caracterizar la secuencia sedimentaria del Pozo-1 en unidades geoquímicas y, con base en relaciones químicas disponibles en la literatura, sugerir condiciones de depósito de la sucesión sedimentaria que lo conforma.
- Relacionar las unidades geoquímicas identificadas con el modelo estratigráfico actual, con el fin de generar una caracterización estratigráfica integrada que apoye el modelo estratigráfico del Pozo-1.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 APLICACIÓN DE LA GEOQUÍMICA INORGÁNICA EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA SUCESIÓN DE ROCAS SEDIMENTARIAS

Tradicionalmente, los sedimentólogos han puesto relativamente poco énfasis en el estudio de la composición química de las rocas sedimentarias siliciclásticas, en agudo contraste con los geólogos que estudian las rocas ígneas y metamórficas. Esta falta de interés se atribuye principalmente a la creencia común de que la composición química de las rocas siliciclásticas es menos útil que la composición mineral para interpretar la historia y la procedencia. Además, la presente composición química de estas rocas puede no reflejar con exactitud su composición en el momento de la depositación, ya que la cristalización de nuevos minerales durante el enterramiento de los sedimentos y la diagénesis puede cambiar la composición química original.⁴

Mencionado lo anterior, se espera que en una sucesión de rocas sedimentarias o de sedimentos, la constitución elemental sea altamente variable debido a la composición de las rocas del área fuente, paleoclima predominante durante la generación, transporte y depositación del sedimento, facies sedimentarias, y diagénesis soportada por el sedimento. Incluso en secuencias aparentemente homogéneas, la geoquímica de roca total puede contener contrastes que permiten su diferenciación en unidades de roca diferenciables.⁵

⁴ BOGGS, Sam. Principles of sedimentology and stratigraphy. Fourth Edition. Pearson Prentice Hall. USA. 2006. ISBN 0-13-154728-3. Disponible en: https://books.google.com.co/books/about/Principles_of_Sedimentology_and_Stratigr.html?id=Kb0SAQAAlA-AJ&redir_esc=y

⁵ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY, Op. Cit.

Los cambios en la geoquímica que permiten una definición única son controlados por las variaciones en los componentes detríticos de las areniscas y limolitas.⁶ Cuando los datos geoquímicos se evalúan en el contexto estratigráfico, se logra un estudio quimioestratigráfico que implica la aplicación de elementos mayores y traza para la caracterización de la sucesión sedimentaria en unidades geoquímicas distintas.⁷

La quimioestratigrafía elemental aplicada a la industria del petróleo y gas ha proliferado en la última década debido a su objetividad e independencia en modelar cambios de características geológicas, tales como la procedencia de sedimentos, variaciones litológicas simples o fluctuaciones en la entrada de material terrígeno⁸; sin embargo, al ser una metodología estratigráfica relativamente nueva, la mayoría de los estudios son confidenciales y los resultados permanecen inéditos.⁹

La composición química de las rocas en el área de procedencia es probablemente el mayor control sobre la química del sedimento y, a pesar de que puede ser modificada por procesos posteriores, la composición de la roca madre está en

⁶ WRIGHT, Amelia; RATCLIFFE, Ken. The chemostratigraphic typing of the Nanushuk and Tuluva Formations (Cretaceous), Colville Basin, Northern Alaska. 2004. Disponible en: <http://www.geoconvention.com/archives/2004/225S0208.pdf>

⁷ REÁTEGUI, Katya; MARTÍNEZ, Manuel; ESTEVES, Iván; GUTIÉRREZ, Jose; MARTÍNEZ, Alejandro; MELÉNDE, Williams; URBANI, Franco. Geochemistry of the Mirador Formation (Late Eocene-Early Oligocene), southwestern Venezuela: Chemostratigraphic constraints on provenance and the influence of the sea level. *Geochemical Journal*. 2005. Vol. 39. 213-226 p. Disponible en: <https://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/3903/39030213.pdf>

⁸ CARACCILO, Luca; HENARES, Saturnina; VISERAS, Cesar; HOFFMANN, Stefan; RILEY, David; KLISCHIES, Ralf; PEARCE, Tim. Combined chemostratigraphy and high resolution sandstone petrography (HRSP) for enhanced fluvial siliciclastic reservoir quality assessment. Conference paper. 2015. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Luca_Caracciolo

⁹ RATCLIFFE, Ken; MARTIN, J.; PEARCE, T.; HUGHES, A.; LAWTON, D.; WRAY, D.; BESSA, F. A regional chemostratigraphically-defined correlation framework for the Late Triassic TAG-I formation in blocks 402 and 405a, Algeria. 2006. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/249553009_A_regional_chemostratigraphically-defined_correlation_framework_for_the_late_Triassic_TAG-I_Formation_in_Blocks_402_and_405a_Algeria

función de la configuración tectónica del área de procedencia¹⁰. Las condiciones de meteorización también pueden dejar su huella en el sedimento, y los estudios de los elementos mayores en las rocas sedimentarias indican que a veces las primeras condiciones de meteorización pueden reconocerse a partir del análisis químico de los sedimentos. También pueden ocurrir cambios químicos significativos durante el transporte: algunos elementos traza se concentran en el componente arcilla y en la fracción mineral pesada, mientras que otros son diluidos en la fracción gruesa rica en cuarzo. Estos procesos son en gran parte dependientes del tiempo entre la erosión y la depositación.¹¹

Los cambios químicos durante la sedimentación dependerán del ambiente de depositación, el cual es controlado principalmente por la tasa de subsidencia, los procesos químicos y bioquímicos que controlan la solubilidad de los elementos en el agua, las condiciones meteorológicas y las condiciones redox en ciertos tipos de sedimentos¹².

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la geoquímica inorgánica se ve reflejada en los elementos químicos que constituyen los sedimentos. Los elementos químicos pueden relacionarse entre sí e interpretarse de acuerdo a su grado de concentración en las muestras de sedimento o roca analizadas, y estas concentraciones a su vez reflejarán los procesos que afectan el sedimento, los cuales son respuesta a controles geológicos como el área fuente y el clima, interviniendo éste último en las condiciones químicas del medio de depósito.

¹⁰ ROLLINSON, Hugh. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Pearson Education Limited. England. 1993. 5-7 p. 22-23 p. ISBN-10:0-582-06701-4.

¹¹ *Ibíd.*

¹² *Ibíd.*

4.1.1 Procedencia. Diferentes autores en sus publicaciones mencionan relaciones de elementos útiles para interpretaciones de cambios en la procedencia. Existen algunos elementos asociados con minerales pesados y que en última instancia pueden estar vinculados a las variaciones en el medio ambiente y la procedencia del sedimento, por ejemplo, Zirconio (Zr), Hafnio (Hf), Titanio (Ti), Nubidio (Nb), Tántalo (Ta), Torio (Th), y Cromo (Cr) (Pearce et al., 2010). Los altos niveles de U pueden proceder también de horizontes que contienen minerales pesados excepcionalmente abundantes, como el circón, apatito, y monacita, que se producen como granos de limo incluso en lutitas. Estos altos niveles de elementos conducirían a que las muestras se clasifiquen como "marinas". Para compensar esto, la relación Zr/U se utiliza para identificar aquellas muestras que contienen abundantes minerales pesados en vez de contenidos absolutos de U.¹³

Incrementos en las concentraciones de Cerio (Ce), Galio (Ga), Rubidio (Rb), Sc, y Nb, están asociados con cambios en la roca fuente.¹⁴

El patrón REE y la anomalía de Europio (Eu) proporcionan pistas importantes también con respecto a las características de la roca fuente¹⁵. Las relaciones LREE / HREE más altas y las anomalías negativas de Eu se encuentran generalmente en las rocas félsicas, mientras que las rocas máficas presentan menores relaciones LREE / HREE y ausencia o pequeñas anomalías de Eu.¹⁶

¹³ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY. Op. Cit.

¹⁴ NARANJO, Julián; GÓMEZ, Pedro; GÉLVEZ, Jaime; DUQUE, N.; MORENO, N. Methodology proposal for correlation studies of fluvial sediments base on petrographic and lithogeochemical analysis: example of its application on Cenozoic rock from the Lisama Formation (Middle Magdalena Valley, Colombia). CT&F – Ciencia, tecnología y futuro, 5(3). 2013. 19-46 p.

¹⁵ NAGARAJAN, Ramasamy; MADHAVARAJU, Jayagopal; NAGENDRA, Raghavendra; ARMSTRONG-ALTRIN, John; MOUTTE, Jacques. Geochemistry of Neoproterozoic shales of the Rabanpalli Formation, Bhima Basin, Northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2007. Vol. 24, núm. 2. 150-160 p. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=EB15D45A110837B68CFE747B3FAB7BA9?doi=10.1.1.518.484&rep=rep1&type=pdf>

¹⁶ *Ibíd.*

La abundancia de Cr y Ni en los sedimentos siliciclásticos se considera un indicador útil en los estudios de procedencia. Una baja concentración de Cr indica una procedencia félsica, y altos contenidos de Cr y Ni se encuentran principalmente en los sedimentos derivados de rocas ultramáficas¹⁷.

Elementos traza tales como Lantano (La), Itrio (Y), Escandio (Sc), Cr, Th, Zr, Hf, Nb, y en particular Ti, son los más adecuados para estudios de procedencia y determinación de ajustes tectónicos debido a su relativamente baja movilidad durante los procesos sedimentarios¹⁸. La distribución relativa de los elementos inmóviles que difieren en la concentración de rocas félsicas y básicas, como La y Th (enriquecido en rocas félsicas) y Sc, Cr y Co (enriquecido en rocas básicas), permite inferir la contribución relativa de fuentes félsicas y básicas en shales de diferentes entornos tectónicos¹⁹. El Hf al ser un elemento inmóvil tiende a concentrarse en minerales pesados como circón y esfena, reflejando procesos de reciclaje de sedimentos en la generación de los mismos, por lo que un enriquecimiento en dicho elemento es evidente en la presencia de detritos provenientes de rocas sedimentarias.²⁰

Wright and Ratcliffe²¹ (2004), sugieren que el Zr y el Hf generalmente se encuentran en los granos de circón y la relación de Zr/Hf no tiende a fraccionarse en los granos de la misma fuente ígnea. Por lo tanto, cuando los valores de Zr/Hf varían sistemáticamente a través de un intervalo de estudio, implica que se han producido cambios en la procedencia de los sedimentos. Ratcliffe et al.²² (2006) también explica la relación $Zr \times Hf/Al$ como un indicador sensible de la cantidad de granos de circón presentes en las arcillas y menciona que su disminución refleja

¹⁷ Ibíd.

¹⁸ Ibíd.

¹⁹ Ibíd.

²⁰ GELVEZ, Jaime Ricardo. Informe final. Quimioestratigrafía y procedencia de la secuencia Campaniano – Paleoceno del Piedemonte y los Llanos Centrales. Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo. Unidad de Servicios Técnicos y Laboratorios. Laboratorio de Petrología. Piedecuesta – Santander. 2007

²¹ WRIGHT, RATCLIFFE, Op. Cit.

²² RATCLIFFE, MARTIN, PEARCE, HUGHES, LAWTON, WRAY, BESSA, 2006. Op. Cit.

un descenso en el suministro de sedimentos terrestres, como se puede esperar en asociación con un evento transgresivo. Estos tipos de cambios geoquímicos no necesariamente pueden proporcionar información sobre la naturaleza de la fuente de sedimentos, pero son indicadores muy sensibles del cambio de procedencia²³; como es el caso del índice RTi, donde Ratcliffe et al.²⁴ (2012) lo calculan sumando Al, Ti, Fe y K, y proporciona una idea de la cantidad de material terrígeno en el sedimento.

Los elementos como Cr, Zr, Al, Ti, Ga y Rb, son controlados por cambios en la cantidad y la composición de material terrígeno arrastrado por el viento y el material tobáceo. También se incluye en este grupo el Th y Nb, los cuales se asocian típicamente con la entrada de detritos en los sistemas depositacionales²⁵. Variaciones en las relaciones de Al/Ti y Na/K son causadas por los cambios de aporte de ceniza volcánica y arcillas detríticas. Cuando la proporción relativa de arcillas detríticas es rica en K (illita+ clorita), sugiere una influencia de regiones fuente de sedimento fluvial²⁶.

Las concentraciones de aluminio son una buena medida de flujo detrítico, en donde las correlaciones positivas de Ti y K y Na con Al (con coeficiente de correlación lineal R² cercano a 1) indican que estos elementos están asociados con fases detríticas²⁷.

²³ WRIGHT, RATCLIFFE, Op. Cit.

²⁴ RATCLIFFE, K.; WOODS, J.; RICE, C. Determining well-bore pathways during multilateral drilling campaigns in shale resource plays: an example using chemostratigraphy from the Horn River Formation, British Columbia, Canada. Eastern Australasian Basins Symposium IV. Brisbane, Queensland. 2012. Disponible en: https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/07/EABS4_Ratcliffe-et-al.pdf

²⁵ DAVIES, E.; RATCLIFFE, K.; MONTGOMERY, P.; POMAR, L.; ELLWOOD, B.; WRAY, D. Magnetic susceptibility (χ) stratigraphy and chemostratigraphy applied to an isolated carbonate platform reef complex; Lluçmajor platform, Mallorca. SEPM Special Publication dedicated to the Deposits, Architecture and Controls of Carbonate Margin, Slope, and Basin Systems. 2013. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/07/Davies-et-al.-2013-Integrated-stratigraphy-of-isolated-carbonate-platforms-in-SEPM-Spec.pdf>

²⁶ EINSELE, Gerhard; RICKEN, Werner; SEILACHER, Adolf. Cycles and events in stratigraphy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991, 126 – 166 p. ISBN 3-540-52784-2.

²⁷ NAGARAJAN, MADHAVARAJU, NAGENDRA, ARMSTRONG-ALTRIN, MOUTTE, Op. Cit.

4.1.1.1 La composición mineralógica y su relación con los elementos químicos. Cuando se trata de secuencias siliciclásticas, el Si se asocia preferentemente con cuarzo y el Al se asocia típicamente con los minerales de arcilla²⁸. El silicio, expresado como Si, es el constituyente químico más abundante en todos los tipos de areniscas debido a la abundancia de cuarzo y la presencia de silicio en todos los minerales de silicato. El aluminio (Al) es moderadamente abundante en areniscas que contienen feldespatos o en areniscas ricas en fragmentos de roca que contienen una matriz de minerales arcillosos, y es mucho menos abundante en areniscas ricas en cuarzo, que comúnmente no tienen una matriz de arcilla. En promedio, el hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio, son menos abundantes en areniscas que el aluminio. Las concentraciones relativas de estos elementos varían en función de la mineralogía de los granos de tamaño de arena y de los tipos de minerales de arcilla de la matriz y cementos diagenéticos en la roca. Por ejemplo, las areniscas con abundante cemento de carbonato de calcio o fósiles carbonatados pueden tener un contenido de calcio anormalmente alto²⁹.

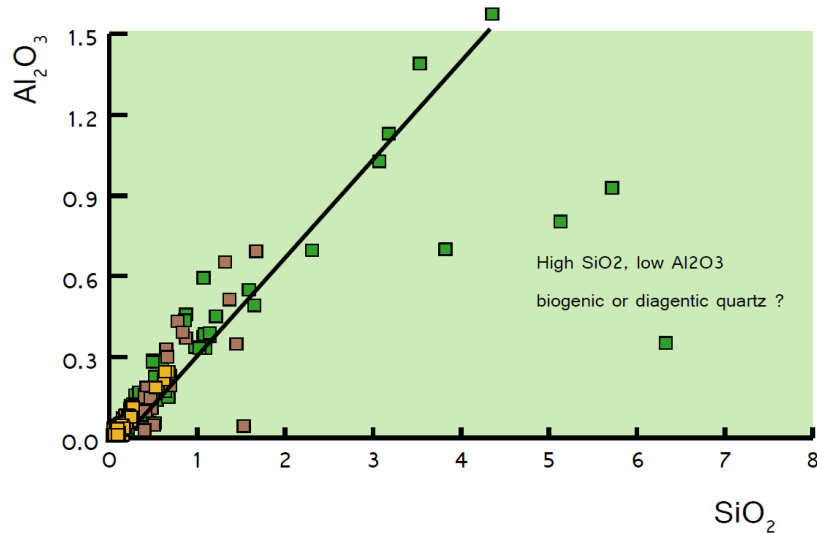
El hecho de que el Si y el Al tengan un coeficiente $R^2 > 0,95$ (**Figura 1**) indica que el cuarzo está también ligado de alguna manera a los minerales de arcilla. Típicamente, en un sistema siliciclástico, diagramas binarios de Si vs. Al producen asociaciones lineales negativas, porque cuando el cuarzo aumenta de volumen dentro del sedimento, la arcilla disminuye, resultando en la tendencia de limo-dilución de Pearce et al. (2005) citado por Davies et al.³⁰, (2013).

²⁸ DAVIES, RATCLIFFE, MONTGOMERY, POMAR, ELLWOOD, WRAY, Op. Cit.

²⁹ BOGGS, Op. Cit.

³⁰ DAVIES, RATCLIFFE, MONTGOMERY, POMAR, ELLWOOD, WRAY, Op. Cit.

Figura 1. Diagrama binario construido para entender la relación elemento-elemento



Fuente: DAVIES, E.; RATCLIFFE, K.; MONTGOMERY, P.; POMAR, L.; ELLWOOD, B.; WRAY, D. Magnetic susceptibility (χ stratigraphy and chemostratigraphy applied to an isolated carbonate platform reef complex; Lluçmajor platform, Mallorca. SEPM Special Publication dedicated to the Deposits, Architecture and Controls of Carbonate Margin, Slope, and Basin Systems. 2013. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/07/Davies-et-al.-2013-Integrated-stratigraphy-of-isolated-carbonate-platforms-in-SEPM-Spec.pdf>

Se puede suponer que los elementos asociados con Al también están relacionados principalmente con minerales de arcilla en los sedimentos. Al estar presente en los minerales de arcilla y feldespatos, ambos grupos potencialmente influyen en la distribución de Aluminio. Sin embargo, aunque los feldespatos estén presentes, los minerales de arcilla son volumétricamente la fuente más importante de Al, lo que sugiere que la distribución del tipo de mineral de arcilla será el control primario sobre las distribuciones de dicho elemento³¹.

³¹ RATCLIFFE, K; WRIGHT, A.; HALLSWORTH, C.; MORTON, A.; ZAITLIN, B.; POTOCKI, D.; WRAY, D. An example of alternative correlation techniques in a low-accommodation setting, nonmarine hydrocarbon system: The (Lower Cretaceous) Mannville Basal Quartz succession of southern Alberta. AAPG Bulletin. 2004, V. 88, N° 10, 1419–1432 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

Por otra parte, la abundancia de los elementos Ca, Mg y Mn es controlada por la presencia y distribución de minerales de carbonato, de los cuales la dolomita es la más importante, seguida de la Calcita. Elementos como el Fe, V, Co y Ni son principalmente asociados con la distribución de cementos ricos en Fe como hematita, siderita, mientras que el P, Y, Sr y las REEs tienen afinidades con el fosfato y en menor medida con minerales pesados fosfatados, por ejemplo, apatita y monacita.³²

Existen algunos elementos asociados con cambios en facies y mineralogía de arcillas, por ejemplo, Ca, Na, K, Fe, Magnesio (Mg), P, U, Molibdeno (Mo), Cesio (Cs), Sc, Estroncio (Sr), V, Rb, Ni, Cu y Co³³.

Ratcliffe et al. (2010)³⁴, menciona también elementos y asociaciones de elementos que responden a una afinidad arcillosa, tales como:

- El Cs, el cual parece estar relacionado con la proporción de illita/esmectita.
- La relación Na/Al, donde se refleja la proporción de plagioclasa en las arcillas.
- Si/Al, donde se imita el contenido de cuarzo en las arcillas limosas.
- (Fe + Mg)/Al, donde se imita muy bien el contenido de siderita.
- Ga/Rb, donde se relaciona la proporción de la caolinita en las arcillas limosas.

³² SPRAGUE, Ronald; MELVIN, John; CONRADI, Florian; PEARCE, Tim; DIX, Mike; HILL, Steve; CANHAM, Andrew. Integration of Core-based Chemostratigraphy and Petrography of the Devonian Jauf Sandstones, Uthmaniya Area, Ghawar Field, Eastern Saudi Arabia. Adapted from oral presentation AAPG Convention (20-23 April: San Antonio, Texas). 2008. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

³³ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY, Op. Cit.

³⁴ Ratcliffe, K.T.; Wright, A.M.; Montgomery, P.; Palfrey, A.; Vonk, A.; Vermeulen, J. and Barrett, M. Application of chemostratigraphy to the mungaroo formation, the gorgon field, offshore Northwest Australia. 2010.

El Ga y Rb están controlados por la distribución de minerales de arcilla; sin embargo, el Ga se enriquece comúnmente en caolinita³⁵, mientras que el Rb es más frecuente en illita³⁶. Por lo tanto, la relación de Ga/Rb refleja la relación de caolinita/illita. Davies et al. (2013) asocian el Ga y el Al mineralógicamente a contenidos de caolinita y el Rb con illita³⁷. Es decir, los valores altos de la relación Ga/Rb sugieren que los sedimentos tienen un aporte alto de caolinita.

El Rb se encuentra en una gama de minerales que forman rocas, comúnmente minerales de arcilla y feldespato. En la **Figura 2** se muestra una relación lineal positiva global entre el Rb y K, lo que indica que se encuentran juntos en los mismos minerales³⁸. El Ti puede ocurrir también en minerales de arcilla, más notablemente en illita, así como minerales pesados, tales como rutilo y anatasa. Si la illita es el control primario sobre las concentraciones de Ti, se esperaría una relación lineal positiva cuando las muestras de arcillas limosas se representen en un diagrama binario Ti vs. Al³⁹.

³⁵ RATCLIFFE, Ken; WRIGHT, A.; MONTGOMERY, P.; PALFREY, A.; VONK, A.; VERMEULEN, J.; BARRETT, M. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon Field, Offshore northwest Australia. APPEA Journal. 2010, 371-384 p. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/%E2%80%9CApplications-of-chemostratigraphy-to-the-Mungaroo-Formation-the-Gorgon-Field-Offshore-NW-Australia%E2%80%9D-Paper.pdf>

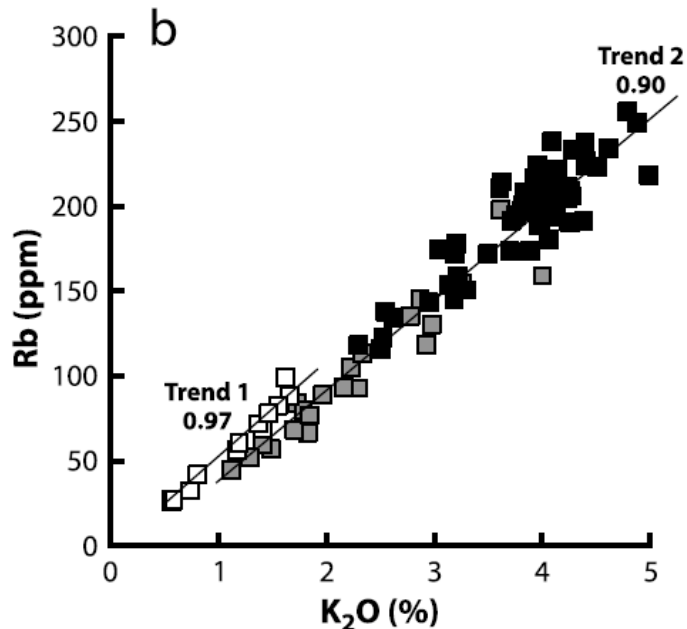
³⁶ *Ibíd.*

³⁷ *Ibíd.*

³⁸ RATCLIFFE, WRIGHT, HALLSWORTH, MORTON, ZAITLIN, POTOCKI, WRAY, Op. Cit. 2004

³⁹ *Ibíd.*

Figura 2. Diagrama binario construido para mostrar la relación colinear entre elementos.



Fuente: RATCLIFFE, K; WRIGHT, A.; HALLSWORTH, C.; MORTON, A.; ZAITLIN, B.; POTOCKI, D.; WRAY, D. An example of alternative correlation techniques in a low-accommodation setting, nonmarine hydrocarbon system: The (Lower Cretaceous) Mannville Basal Quartz succession of southern Alberta. AAPG Bulletin. 2004, V. 88, N° 10, 1419–1432 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

El valor numérico debajo de cada línea de tendencia es el coeficiente R². Si R² es mayor o igual a 0.75, los elementos tienen una gran correlación, lo cual implica que ellos están presentes en el mismo mineral en el sedimento. (b) bajos valores de K₂O/Rb (tendencia 2), indica altos contenidos de feldespato potásico

Ratcliffe et al. (2006)⁴⁰ demuestran la relación K/Al como indicadora de un cambio en la procedencia de sedimentos finos, siendo visto en los cambios de la concentración del feldespato, pues diferencias en su contenido hace referencia a cambios en la mineralogía, en donde los bajos valores de K/Al en arcillas refleja

⁴⁰ RATCLIFFE, MARTIN, PEARCE, HUGHES, LAWTON, WRAY, BESSA, Op. Cit. 2006.

los altos contenidos de caolinita, mientras que valores relativamente altos refleja altos contenidos de illita. De igual manera, Wright et al. (2010)⁴¹, sugieren que los valores de Al y K son controlados en gran parte por la abundancia de minerales de arcilla, y la relación Al/K es influenciada por la proporción caolinita/illita en las lodolitas. También sugieren utilizar elementos y relaciones tales como Al, K, K/Al, Nb/Al, Ti/Nb, Zr/Ti, con el fin de diferenciar las lodolitas en los intervalos de estudio. Ratcliffe et al. (2004)⁴² y Hildred et al. (2007)⁴³ luego de haber hecho un análisis detallado de relaciones mineral-elemento, y haber comparado resultados de roca total mediante DRX y datos de petrografía, también proponen el uso de estos elementos para caracterizar las lodolitas de la secuencia.⁴⁴

Ratcliffe et al. (2010)⁴⁵, explican a manera de resumen, los elementos químicos principales según su estudio y su asociación en grupos conforme a su afinidad mineralógica, lo anterior mediante un análisis de componentes principales (PCA)

(Figura 3):

⁴¹ WRIGHT, Amelia; RATCLIFFE, Ken; ZAITLIN, Brian; WRAY, Davies. The application of chemostratigraphic techniques to distinguish compound incised valleys in low-accommodation incised-valley systems in a foreland-basin setting: an example from the lower cretaceous Mannville Group and Basal Colorado Sandstone (Colorado Group), Western Canadian sedimentary basin. SEPM Special Publication N° 94. 2010. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/The-Application-of-Chemostratigraphic-Techniques-to-Distinguish-Compound-Incised-Valleys-in-Low-Accommodation-Incised-Valley-Systems-in-a-Foreland-Basin-Setting-an-Example-from-the-Lower-Cretaceous-Mannville-Group.pdf>

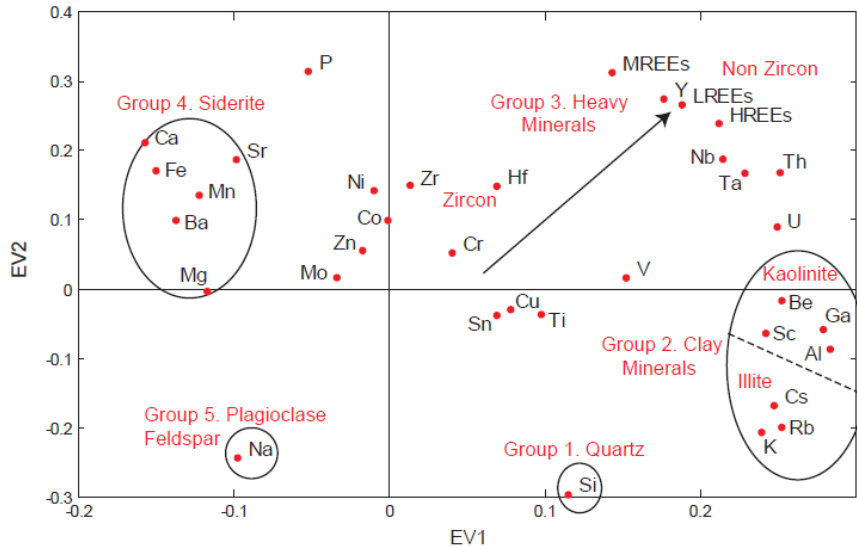
⁴² RATCLIFFE, WRIGHT, HALLSWORTH, MORTON, ZAITLIN, POTOCKI, WRAY, 2004. Op. Cit.

⁴³ HILDRED, Gemma; RATCLIFFE, Ken; SCHMIDT, K. Application of Inorganic Whole-Rock Geochemistry to Shale Resource Plays: An Example from the Eagle Ford Shale, Texas. Northsiders Luncheon Meeting. Houston Geological Society (19 April: Houston, Texas). 2011, 31-33 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

⁴⁴ WRIGHT, RATCLIFFE, ZAITLIN, WRAY, 2010. Op. Cit.

⁴⁵ RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010. Op. Cit.

Figura 3. Cross plot de Eigenvector a partir de un análisis de componentes principales (PCA) de todas las muestras de arcillolitas



Fuente: RATCLIFFE, Ken; WRIGHT, A.; MONTGOMERY, P.; PALFREY, A.; VONK, A.; VERMEULEN, J.; BARRETT, M. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon Field, Offshore northwest Australia. APPEA Journal. 2010, 371-384 p. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/%E2%80%9CAplications-of-chemostratigraphy-to-the-Mungaroo-Formation-the-Gorgon-Field-Offshore-NW-Australia%E2%80%9D-Paper.pdf>

- El grupo 1 incluye Si, cuya concentración en las arcillas limosas se relaciona con la abundancia de cuarzo, que por lo general se produce en forma de granos de grado limo.
- El grupo 2 incluye K, Rb, Sc, Cs, Be, Ga y Al. El Al modela el contenido total de arcilla, por lo tanto, las concentraciones de elementos ubicados en la proximidad del Al también se controlan principalmente por minerales de arcilla. Generalmente el Ga se asocia con caolinita, por tal razón, su posición en las proximidades del Al (**Figura 3**), mientras que Rb, Cs y K son más comunes en illita - esmectita.

- El grupo 3 incluye Zr, Hf, Cr, MREE, HREE, LREE, Nb, Iterbio (Yb), Ta, Th y U. El Zr y Hf típicamente reflejan la abundancia del circón como mineral pesado⁴⁶. Por lo tanto, otras variables situadas en asociación con estos dos elementos están probablemente asociadas con minerales pesados (**Figura 3**). Sin embargo, sin un análisis de corroboración de minerales pesados⁴⁷ no es posible determinar en forma categórica cuales de estos minerales están controlando los elementos; pero de los elementos clave, el Nb es típicamente asociado con minerales pesados de óxido de titanio tales como anatasa y rutilo⁴⁸, mientras que el Cr es más típicamente asociado con minerales pesados máficos tales como la espinela⁴⁹.
- El grupo 4 incluye Ca, Fe, Mn, Ba y Mg, que probablemente están asociados con los carbonatos ferrosos tales como la siderita. Sin embargo, la **Figura 4** muestra que la relación entre estos elementos y la siderita no es perfecta y se supone por lo tanto que múltiples minerales afectan a estos elementos.
- El grupo 5 incluye al Na, que está estrechamente asociado a la abundancia de feldespato plagioclasa (**Figura 3**).

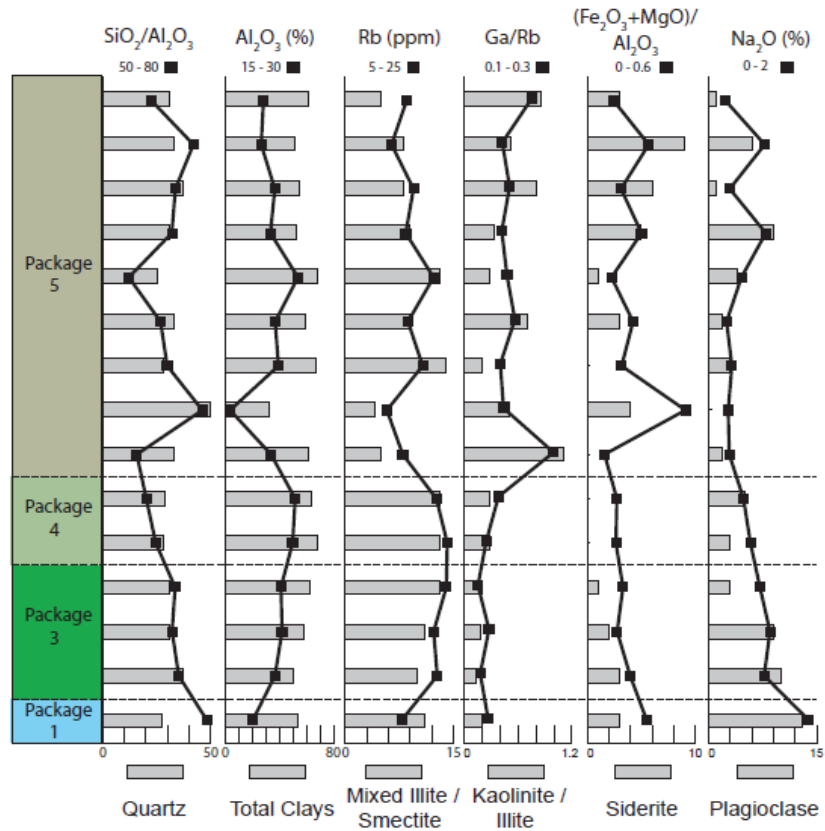
⁴⁶ RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010. Op. Cit.

⁴⁷ *Ibíd.*

⁴⁸ *Ibíd.*

⁴⁹ *Ibíd.*

Figura 4. Comparación de elementos seleccionados y proporciones de elementos con datos mineralógicos adquiridos usando análisis DRX



Fuente: RATCLIFFE, Ken; WRIGHT, A.; MONTGOMERY, P.; PALFREY, A.; VONK, A.; VERMEULEN, J.; BARRETT, M. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon Field, Offshore northwest Australia. APPEA Journal. 2010, 371-384 p. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/%E2%80%9CApplications-of-chemostratigraphy-to-the-Mungaroo-Formation-the-Gorgon-Field-Offshore-NW-Australia%E2%80%9D-Paper.pdf>

4.1.2 Paleoclima. Debido a que la mayoría de los granos en las rocas sedimentarias siliciclásticas se derivan de diversos tipos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, la mineralogía y la composición química de las rocas siliciclásticas son claramente una función de la composición de la roca madre. No obstante, las rocas sedimentarias presentan diferencias químicas debido a cambios químicos que ocurren durante la meteorización y la diagénesis⁵⁰.

Las diferencias composicionales entre facies pueden ser debido a fluctuaciones en las condiciones climáticas⁵¹; como es el caso de la afectación de los elementos inmóviles, donde un empobrecimiento de dichos elementos es resultado de fuertes regímenes de meteorización⁵².

Las rocas sedimentarias tienden a ser enriquecidas en sílice y agotadas en hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio en comparación con la roca madre. El enriquecimiento en sílice ocurre porque los minerales silíceos resisten la meteorización química. Además, la estabilidad química de los minerales de SiO₂ tales como el cuarzo y el chert, hace que las rocas sedimentarias se enriquezcan progresivamente en estos minerales durante múltiples eventos de reciclaje. Por lo tanto, en general, el contenido de sílice aumenta a expensas de minerales ricos en hierro y magnesio menos estables⁵³.

Los controles fundamentales sobre la precipitación de los constituyentes disueltos del agua son pH y Eh (**Figura 5**). El símbolo pH representa una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El Eh o potencial redox, es una medida de la capacidad oxidante o reductora de una solución. El Eh es particularmente importante para el comportamiento de iones polivalentes tales como hierro,

⁵⁰ BOGGS, 2006. Op. Cit.

⁵¹ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

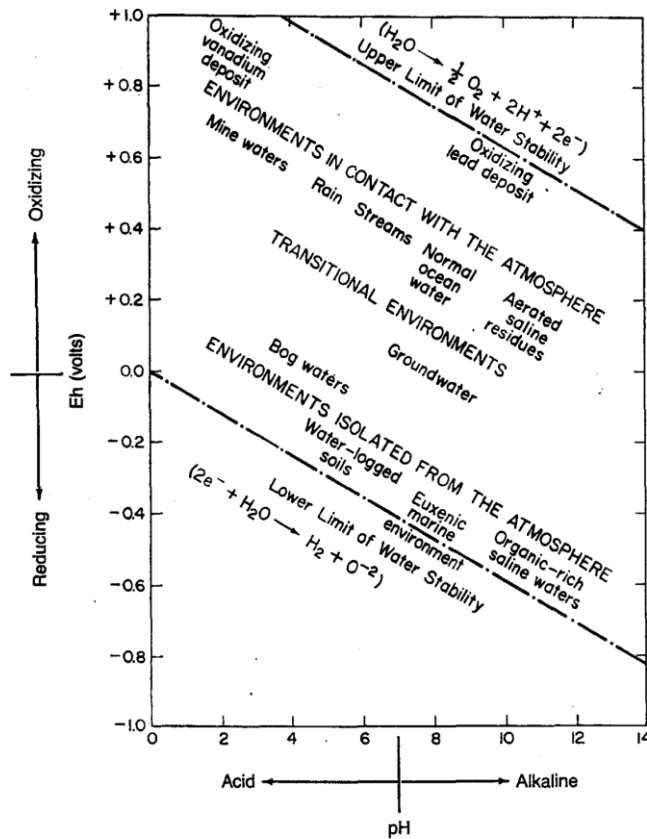
⁵² GÉLVEZ, Op. Cit.

⁵³ BOGGS, 2006. Op. Cit.

manganeso y azufre. La oxidación implica la pérdida de electrones orbitales de un átomo, mientras que la reducción implica ganancia de electrones orbitales. Bajo condiciones naturales en ambientes sedimentarios, el Eh es controlado por la abundancia relativa de oxígeno gaseoso y materia orgánica disponible descompuesta por oxidación. Las condiciones de oxidación prevalecen cuando el oxígeno gaseoso es abundante, reduciendo las condiciones donde el oxígeno gaseoso es escaso y la materia orgánica abundante, como en ambientes pantanosos. El Eh se expresa en una escala -1 a +1. Los valores positivos de Eh representan condiciones oxidantes, los valores negativos representan condiciones reductoras⁵⁴.

⁵⁴ BOGGS, Sam. Principles of sedimentology and stratigraphy. Merrill Publishing Company. Ohio, USA. 1987. ISBN 0-675-20487-9. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2015/03/principles-of-sedimentology-and-stratigraphy-by-sam-jr-boggs.pdf>

Figura 5. Gráfica mostrando las variaciones Eh y ph de aguas en ambientes naturales



Fuente: BOGGS, Sam. Principles of sedimentology and stratigraphy. Merril Publishing Company. Ohio, USA. 1987. ISBN 0-675-20487-9. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2015/03/principles-of-sedimentology-and-stratigraphy-by-sam-jr-boggs.pdf>

4.1.2.1 Meteorización química. Los procesos de pH y Eh son influenciados por la meteorización química. Estos procesos implican cambios en los minerales que componen la roca, pudiendo tener lugar reacciones como hidrólisis, solución y oxidación⁵⁵.

⁵⁵ NICHOLS, Gary. Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley-Blackwell. England. 2009. 89-92 p. ISBN 978-1-4051-9379-5. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>

- **Hidrólisis**

Las reacciones de hidrólisis dependen de la disociación del H₂O en iones H y OH, lo cual ocurre cuando hay un agente acidificante presente. Los ácidos naturales que son importantes para promover la hidrólisis son el ácido carbónico (formado por la disolución de dióxido de carbono en el agua) y los ácidos húmicos, una serie de ácidos formados por la descomposición bacteriana de la materia orgánica en los suelos. Muchos silicatos sufren reacciones de hidrólisis, por ejemplo, la formación de caolinita (un mineral de arcilla) a partir de ortoclasa (un feldespato) en reacción con agua⁵⁶.

- **Solución**

La mayoría de los minerales silíceos formadores de rocas tienen una solubilidad muy baja y por lo tanto la mayoría de los tipos de rocas no son susceptibles a una solución rápida, sólo bajo condiciones de aguas fuertemente alcalinas donde la sílice se vuelve moderadamente soluble. Los minerales carbonatados son moderadamente solubles, especialmente si el agua subterránea es ácida. Los más solubles son los minerales de evaporíticos como la halita (cloruro de sodio) y el yeso, los cuales pueden formar un componente importante de la roca madre⁵⁷.

- **Oxidación**

La evidencia más generalizada de oxidación es la formación de óxidos de hierro e hidróxidos de minerales que contienen hierro. El color distintivo rojo-naranja del óxido de hierro férrico se puede ver en muchas rocas expuestas en la superficie, aunque la cantidad de hierro presente puede ser muy pequeña⁵⁸.

Los minerales que forman la roca pueden clasificarse en términos de su estabilidad en el medio ambiente superficial (**Figura 6**). Los minerales estables como el cuarzo son relativamente poco afectados por los procesos de

⁵⁶ *Ibíd.*

⁵⁷ *Ibíd.*

⁵⁸ *Ibíd.*

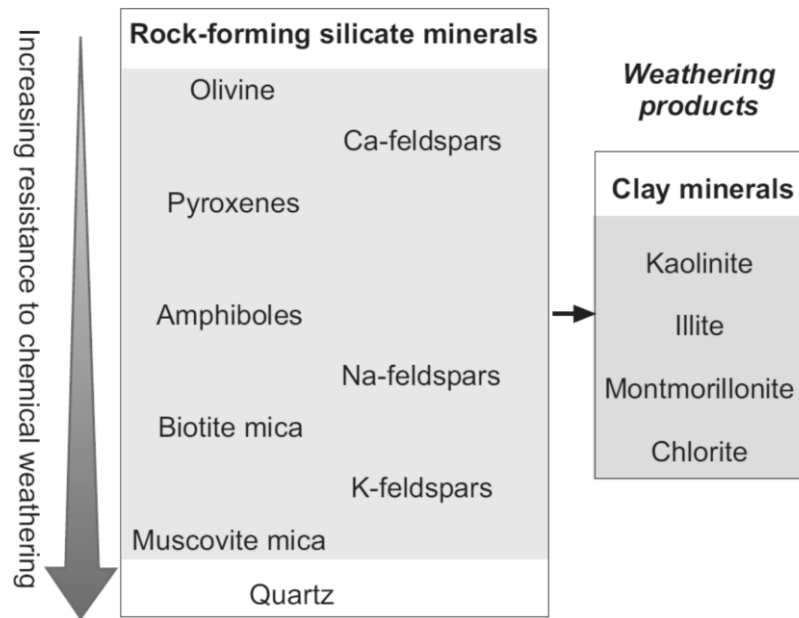
meteorización química y el desgaste físico simplemente separa los cristales de cuarzo unos de otros y de otros minerales en la roca. Micas y feldespatos ortoclásicos son relativamente resistentes a estos procesos, mientras que los feldespatos de plagioclasa, anfíboles, piroxenos y olivinas reaccionan muy fácilmente bajo condiciones superficiales y rara vez se llevan lejos del sitio de intemperismo en un estado inalterado⁵⁹.

Los productos más importantes del desgaste químico de los silicatos son los minerales arcillosos. Una amplia gama de minerales de arcilla se forma como resultado de la descomposición de diferentes minerales rocosos bajo diferentes condiciones químicas; Las más comunes son caolinita, illita, clorita y montmorillonita. Los óxidos de aluminio (bauxita) y hierro (principalmente hematites) también se forman bajo condiciones de meteorización química extrema⁶⁰.

⁵⁹ *Ibíd.*

⁶⁰ *Ibíd.*

Figura 6. La estabilidad relativa de minerales comunes de silicato bajo condiciones de meteorización



Fuente: NICHOLS, Gary. Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley-Blackwell. England. 2009. 89-92 p. ISBN 978-1-4051-9379-5. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>

Un ejemplo que evidencia condiciones de meteorización son los cambios en los valores de $Al/(Ca+Mg+Na+K)$, los cuales tienden a coincidir con los cambios en los valores de Ga/Rb . El Al es un elemento relativamente estable en entornos en los que las precipitaciones son intensas, mientras que el Mg, Ca, Na y K, se lixivian fácilmente en configuraciones similares, por lo que Retallack (1997) utiliza dicha relación como un indicador del grado de meteorización⁶¹. Proporciones altas de esta relación es típico de un desarrollo de paleosuelos⁶².

⁶¹ RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010. Op. Cit.

⁶² RATCLIFFE, MARTIN, PEARCE, HUGHES, LAWTON, WRAY, BESSA, 2006. Op. Cit.

Las arcillas caoliníticas en un entorno fluvial se forman típicamente en los climas cálidos - húmedos, mientras que illita es más típica de los climas más fríos - secos. La illita es un silicato de aluminio y potasio, mientras que la caolinita es un silicato de aluminio, por lo que la relación de K/Al refleja una abundancia relativa de illita en contraste con la caolinita en las arcillas⁶³.

- **Potencial Redox y su relación con la geoquímica inorgánica**

La relación Vanadio/Cromo (V/Cr) se ha utilizado como un índice de paleo-oxigenación en muchos estudios⁶⁴. Valores altos indican condiciones disóxicas, mientras que valores bajos se consideran como condiciones óxicas⁶⁵. El Cr se incorpora principalmente en la fracción detrítica de los sedimentos y puede sustituir al Aluminio (Al) en la estructura arcillosa⁶⁶. El V puede estar unido a la materia orgánica por la incorporación de V⁴⁺ en porfirinas, y se encuentra generalmente en los sedimentos depositados en ambientes reducidos⁶⁷. En esta relación, razones por encima de 2 ppm indica condiciones anóxicas, mientras que valores por debajo de 2 ppm sugieren condiciones más oxidantes⁶⁸.

Algo parecido ocurre con la relación Vanadio/Níquel (V/Ni), siendo también una buena indicadora del grado de oxigenación, donde los niveles óxicos disminuyen al tener valores altos en dicha relación⁶⁹. La relación Cobre/Zinc (Cu/Zn) también se utiliza como un parámetro redox. De acuerdo con Hallberg (1976), las altas

⁶³ RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010. Op. Cit.

⁶⁴ NAGARAJAN, MADHAVARAJU, NAGENDRA, ARMSTRONG-ALTRIN, MOUTTE, 2007. Op. Cit.

⁶⁵ PACHECO MENDOZA, Jael. Caracterización de facies orgánicas de la formación Cansona, cuenca Sinú-San Jacinto a partir de muestras de afloramiento. Trabajo de grado (Pregrado en Geología). Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. 2010. Disponible en: http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001363882

⁶⁶ NAGARAJAN, MADHAVARAJU, NAGENDRA, ARMSTRONG-ALTRIN, MOUTTE, 2007. Op. Cit.

⁶⁷ *Ibíd.*

⁶⁸ *Ibíd.*

⁶⁹ PACHECO MENDOZA, Óp. Cit.

proporciones de Cu/Zn indican condiciones reductoras en el medio de depósito, mientras que las bajas proporciones sugieren condiciones oxidantes.⁷⁰

Otro elemento relacionado con condiciones de óxido-reducción es el Manganeseo (Mn). Las concentraciones de Mn son altamente variables, y casi totalmente dependientes de las condiciones redox, ya que minerales con contenido de Mn reducido (tales como la rodocrosita, $MnCO_3$) son raros en sedimentos marinos y rocas. Es así como las concentraciones de Mn relativamente altas, usualmente son indicios de condiciones más oxidantes y de la presencia de una fase de óxidos⁷¹.

El Hierro (Fe) también permite determinar la abundancia de oxígeno en el entorno de la depositación. Un aumento de hierro en las rocas sugiere la existencia de un medio oxidante⁷². Afirmando lo anterior se encuentran Einsele et al. (1991)⁷³, quienes sugieren que bajo condiciones redox variables, las concentraciones de hierro del sedimento original tienden a estar preservadas, debido a que una vez reducidas, el hierro es fijado en uno de los varios minerales ferrosos, como la pirita.

Concentraciones de elementos como el Cobalto (Co), Níquel (Ni), Vanadio (V), Cromo (Cr), y bajas concentraciones de Mn, reflejan un ambiente de depositación marino en condiciones subóxicas a anóxicas⁷⁴. Hildred et al. (2011)⁷⁵ también consideran que elementos tales como V, Ni, Torio (Th) Uranio (U) y Co, son sensibles a condiciones redox, los cuales proporcionan un medio para ayudar a determinar el grado de anoxia durante la depositación.

⁷⁰ NAGARAJAN, MADHAVARAJU, NAGENDRA, ARMSTRONG-ALTRIN, MOUTTE, 2007. Op. Cit.

⁷¹ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

⁷² PACHECO MENDOZA, Óp. Cit.

⁷³ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

⁷⁴ PACHECO MENDOZA, Óp. Cit.

⁷⁵ HILDRED, RATCLIGGE, SCHMIDT, Op. Cit.

Los bajos contenidos de U se encuentran generalmente en los sedimentos depositados en condiciones oxigenadas en medio marino⁷⁶, mientras que un alto contenido de U se encuentra en los sedimentos de la zona mínima de oxígeno⁷⁷.

En el Mar Árabe, los sedimentos por debajo de la zona mínima de oxígeno (OMZ) muestran altas relaciones U/Th (> 1,25 ppm), mientras que los sedimentos por encima de la OMZ exhiben bajas relaciones U/Th (<1,25 ppm)⁷⁸. Por otra parte, el Th es efectivamente insoluble en agua y por lo tanto su abundancia tiene poca relación con el estado de oxidación de los sedimentos⁷⁹.

- **Potencial Redox y su relación con el contenido de materia orgánica**

El desarrollo de anoxia ayuda a la preservación de la materia orgánica (MO) debido a que la presencia de oxígeno la descompone⁸⁰. En este caso, el Molibdeno (Mo) es muy útil como indicador paleoambiental, ya que sus concentraciones aumentan con el aumento de las condiciones anóxicas, y su relación con el Ni muestra una correlación con Co/Ni, encontrándose que un aumento en la razón Mo/Ni sugiere un aumento en la materia orgánica marina.⁸¹

Elementos como Co, Ni, V y Mo son denominados elementos biófilos, significando que estos elementos se presentan naturalmente en organismos vivos o en materia orgánica. Es por esto que son de gran importancia a la hora de establecer condiciones de oxigenación y origen de la materia orgánica contenida en las rocas (Pacheco, 2010). Adicionalmente, el Azufre (S) está relacionado con altos valores de Carbono Orgánico Total (TOC), al igual que elementos como el V, Ni y Cr, siendo relacionados igualmente con altos contenidos de materia orgánica⁸².

⁷⁶ NAGARAJAN, MADHAVARAJU, NAGENDRA, ARMSTRONG-ALTRIN, MOUTTE, 2007. Op. Cit.

⁷⁷ *Ibíd.*

⁷⁸ *Ibíd.*

⁷⁹ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY, 2010. Op. Cit.

⁸⁰ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

⁸¹ PACHECO MENDOZA, Óp. Cit.

⁸² *Ibíd.*

El U también es utilizado para determinar la cantidad de materia orgánica, teniendo una relación directamente proporcional⁸³. Un ejemplo de ello son las lutitas negras marinas, las cuales tienen más U que las continentales porque las últimas son depositadas en ambientes más oxidantes, donde las formas U6+ son altamente solubles. Las bandas marinas (lutitas negras marinas) se depositan durante épocas de niveles muy bajos de oxígeno y poco aporte clástico, lo que permite la concentración de insolubles U4+ y mayor concentración de la materia orgánica⁸⁴. Debido a la presencia de U, en muchos casos las bandas marinas tienen valores altos de gamma API⁸⁵.

Elementos metálicos, en particular Fósforo (P), Mo, Ni y Cu, pero también Cr, Co, Zn, son igualmente comunes en lutitas negras.

Los altos niveles de Ni, Co, Zn, V, Cu, Cr se encuentran normalmente junto con altos niveles de U y están todos asociados con materia orgánica amorfa (AOM) y sulfuro de minerales como la pirita. El Mo está presente en la pirita y la materia orgánica amorfa, por lo tanto, los niveles de Mo son típicamente muy altos cerca de la costa (marina) en entornos próximos a pantanos con vegetación⁸⁶. Wilde et al. (2004), también afirman que los altos niveles de Mo/Al se pueden vincular con la aparición de AOM⁸⁷.

El Ba, que aparentemente está formado como barita en algunos organismos, está asociado de alguna forma con agregados de partículas ricas en materia orgánica (que caen a través de la columna de agua), y es sugerido como un indicador

⁸³ RATCLIFFE, K.T. WOODS, J. RICE, C. Determining well-bore pathways during multilateral drilling campaigns in shale resource plays: an example using chemostratigraphy from the Horn River Formation, British Columbia, Canada. 10–14 September, 2012.

⁸⁴ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY, 2010. Op. Cit.

⁸⁵ *Ibíd.*

⁸⁶ *Ibíd.*

⁸⁷ *Ibíd.*

representativo de la productividad y flujo de carbono orgánico en el océano moderno, donde flujos de Ba altos están relacionados con mayor productividad primaria⁸⁸. Pacheco (2010)⁸⁹, también menciona que altos contenidos de Ba, además de Cadmio (Cd) y P, se encuentran relacionados con una alta productividad primaria durante la depositación.

Los niveles de P son altos en lutitas que contienen valvas llingula y/o escamas de peces⁹⁰. El cociente P/Al podría indicar también las variaciones en la productividad biológica en el flujo fosfático de restos de peces y/o fósforo orgánico en el fondo marino, lo que podría ser proporcional a la producción primaria de aguas superficiales. Sin embargo, la interpretación acerca de las concentraciones de fosfatos en sedimentos es complicada debido a otras posibles fuentes de fósforo, como aquellas asociadas a conchas de foraminíferos planctónicos y otros componentes calcáreos⁹¹.

Algunos de los elementos nombrados anteriormente tienen aplicabilidad en la indicación de superficies de máxima inundación, siendo ésta geoquímicamente muy distinta debido a los altos valores de elementos asociados con materia orgánica (por ejemplo, U y Mo), pero con valores bajos de elementos asociados con la entrada de detritos terrestres (por ejemplo, Silicio (Si) y Zirconio (Zr)), es decir, se pueden contrastar los sedimentos por encima y por debajo de las proporciones de elementos tales como Th/U y Potasio/Sodio (K/Na), siendo las características típicas de un evento de máxima inundación (**Figura 7**). Adicionalmente, altos valores en la relación K/Rb, modelan un decrecimiento en los contenidos de feldespato potásico a través de dicha superficie⁹².

⁸⁸ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

⁸⁹ PACHECO MENDOZA, Op. Cit.

⁹⁰ PEARCE, MACLEAN, MARTIN, RATCLIFFE, WRAY, 2010. Op. Cit.

⁹¹ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, Op. Cit.

⁹² WRIGHT, RATCLIFFE, 2004. Op. Cit.

Figura 7. Definición geoquímica de la máxima superficie de inundación. Altos valores de materia orgánica = alto Mo y U, bajo aporte de detritos terrestres = bajo Zr. La relación Th/U define claramente la MFS

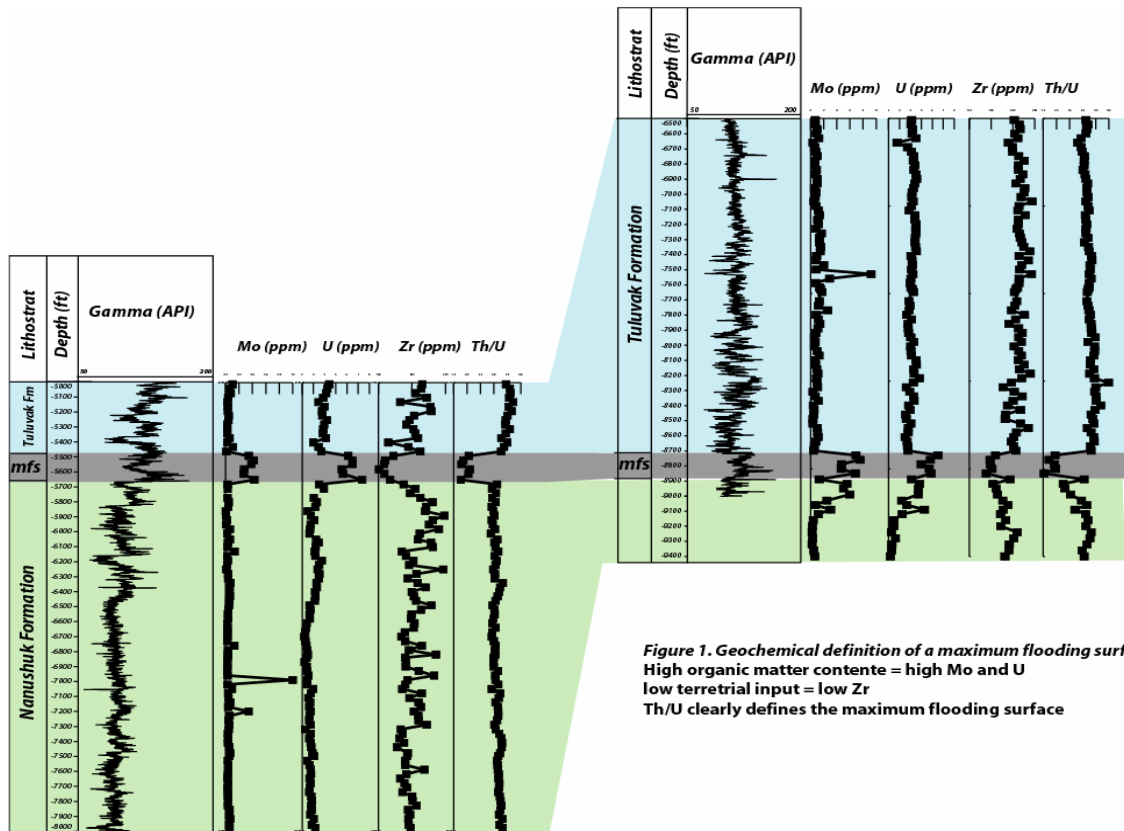


Figure 1. Geochemical definition of a maximum flooding surface. High organic matter content = high Mo and U
low terrestrial input = low Zr
Th/U clearly defines the maximum flooding surface

Fuente: WRIGHT, Amelia; RATCLIFFE, Ken. The chemostratigraphic typing of the Nanushuk and Tuluvaak Formations (Cretaceous), Colville Basin, Northern Alaska. 2004. Disponible en: <http://www.geoconvention.com/archives/2004/225S0208.pdf>

4.2 ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE RAYOS-X (EDS)

La espectrometría de rayos X de energía dispersiva se utiliza para identificar la composición elemental de una muestra, ya que un átomo emite rayos X con

cantidades únicas de energía durante este proceso de transferencia. Así, midiendo las cantidades de energía presentes en los rayos X, puede ser establecida la identidad del átomo⁹³.

Un espectro de EDS exhibe normalmente los picos que corresponden a los niveles de energía para los cuales la mayoría de los rayos X han sido recibidos. Cada uno de estos picos es único a un átomo, y por lo tanto corresponde a un solo elemento, es decir, el pico en un espectro corresponde a un elemento presente en el sólido. Las posiciones de las líneas dan la información sobre la composición cualitativa de la muestra mientras que el número de cuentas de los rayos X corresponde a la concentración de los elementos (altura del pico).⁹⁴

4.2.1 Principio físico general de la EDS. Cuando la muestra es irradiada por un haz de electrones (Figura 8), va a producir que estos electrones visitantes (primarios) interactúen con los electrones de los orbitales del átomo (secundarios)⁹⁵. Esta interacción provocará que un electrón primario expulse a un electrón local de su orbital dejando una vacante en esta capa interna, lo que a su vez producirá un salto de un electrón de una capa superior para llenar dicho espacio.⁹⁶

Esta reestructuración deja al átomo con un excedente de energía debido al impacto electrónico, lo que ocasiona que el átomo emita una familia de rayos X característicos, denominados así ya que la energía de los fotones emitidos está

⁹³ MÁRQUEZ HERRERA, Alfredo. Crecimiento y caracterización de películas delgadas ferroeléctricas de $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ por la técnica de RF-Sputtering. Trabajo de grado (M.Sc. en Tecnología avanzada). Altamira, Tamaulipas. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. 2005. 22 – 23 p. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1265/Tesis%20Final.pdf?sequence=1>

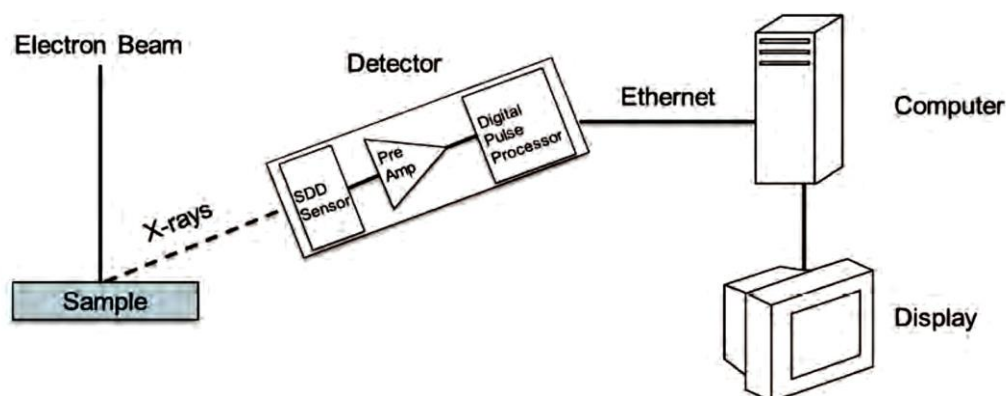
⁹⁴ MÁRQUEZ HERRERA, 2005. Óp. Cit.

⁹⁵ MARTÍNEZ ORELLANA, Adolfo. Microanálisis por dispersión de energías de rayos-X (XEDS). Málaga, España. Servicio de Microscopía Electrónica, Universidad de Málaga. 2010. Disponible en: <http://www.uma.es/sme/nueva/Documentos/EDXS.pdf>

⁹⁶ MELGAREJO, Joan Carles; PROENZA, Joaquín A.; GALÍ, Salvador; LLOVET, Xavier. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 2010. Vol. 62, núm. 1. 1-23 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255708960_Tecnicas_de_caracterizacion_mineral_y_su_aplicacion_en_exploracion_y_explotacion_minera

directamente relacionada con el peso atómico del elemento emisor. De este modo es posible asociar cada valor de energía emitida con un elemento de la tabla periódica, donde la energía de cada fotón va a permitir el análisis cualitativo, y el número de fotones emitido dará la cantidad relativa de cada elemento obteniendo un análisis semicuantitativo.⁹⁷

Figura 8. Componentes de un sistema de espectrometría de energía dispersiva de rayos-X



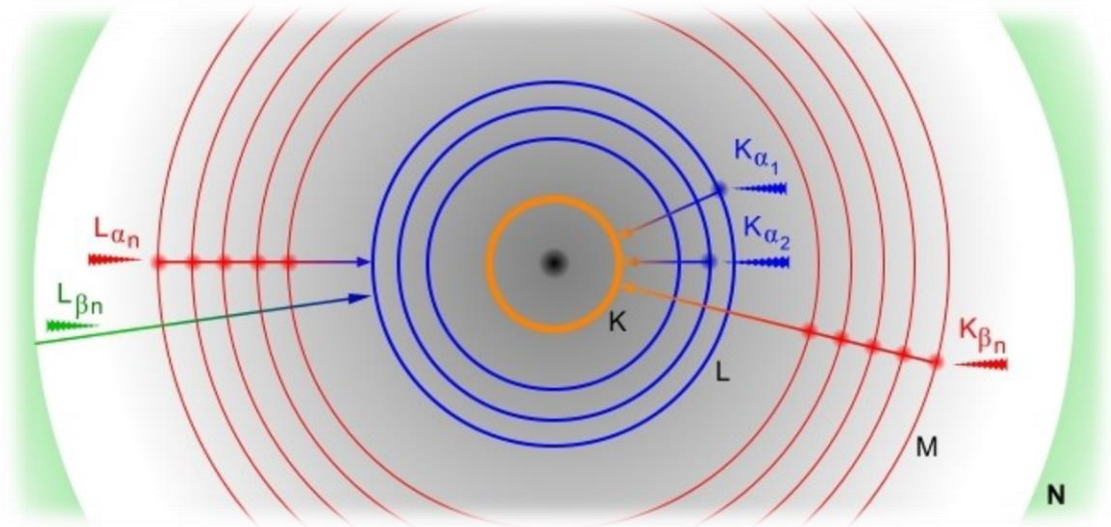
Fuente: HEATH, Julián; TAYLOR, Nick. Energy Dispersive Spectroscopy. Second Edition. Jhon Wiley & Sons LTD. 2015. Disponible en: <http://www.essentialknowledgebriefings.com/downloads/energy-dispersive-spectroscopy/>

De este modo, al espectro continuo de rayos X, originado por la radiación de frenado, se le superpone una serie de picos que se corresponden con las radiaciones características (**Figura 9**) de cada uno de los elementos presentes en la muestra. Este espectro se genera en muy pocos segundos y la identificación del elemento, que es generada por cada uno de los picos, es inmediata; de modo que el análisis de todos los elementos químicos presentes en la muestra, por encima del límite de detección del método, puede realizarse en escasos segundos. Por tanto, este método es práctico (en tiempo y costo) para realizar análisis cualitativos y semicuantitativos puntuales.⁹⁸

⁹⁷ MARTÍNEZ ORELLANA, Óp. Cit.

⁹⁸ MELGAREJO, PROENZA, GALÍ, LLOVET, Óp. Cit.

Figura 9. Generación de algunos de los rayos-X más usuales

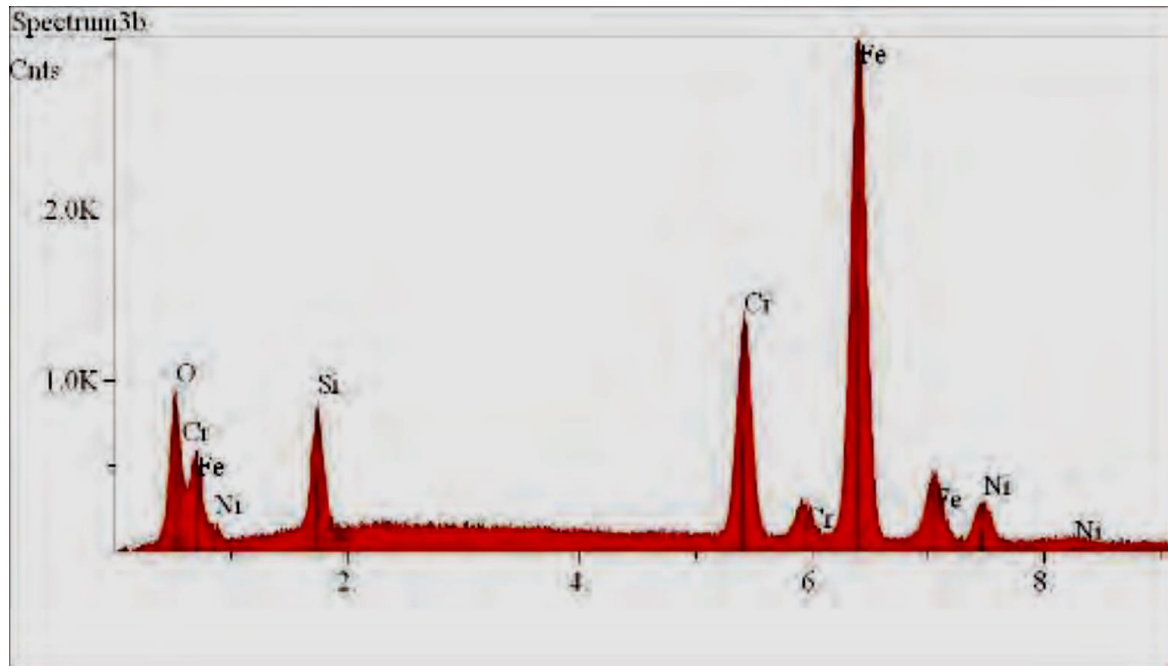


Fuente: MARTÍNEZ ORELLANA, Adolfo. Microanálisis por dispersión de energías de rayos-X (XEDS). Málaga, España. Servicio de Microscopía Electrónica, Universidad de Málaga. 2010. Disponible en: <http://www.uma.es/sme/nueva/Documentos/EDXS.pdf>

Por otra parte, la intensidad de los rayos X producidos por cada elemento depende de la cantidad del mismo que haya en la muestra, de modo que el espectro (**Figura 10**) contiene dos niveles de información de acuerdo a la energía de los rayos X emitidos (intensidad versus energía): por una parte, al espectro continuo se le superpone el espectro característico, en el que la posición de cada pico indica la energía de una radiación X de un elemento; por otra parte, la intensidad de cada pico (o lo que es lo mismo, la altura del mismo), es directamente proporcional a la cantidad de este elemento en la muestra. Por tanto, puede utilizarse este método para determinar la composición química de un volumen de muestra, si se desea, del orden de $1 \mu\text{m}^3$.⁹⁹

⁹⁹ MELGAREJO, PROENZA, GALÍ, LLOVET, Óp. Cit.

Figura 10. Espectro de rayos-X de energía dispersiva mostrando los picos de los elementos principales encontrados en la muestra



Fuente: HEATH, Julian. TAYLOR, Nick. Energy Dispersive Spectroscopy. Second Edition. Jhon Wiley & Sons Ltd. 2015. Disponible en: <http://www.essentialknowledgebriefings.com/downloads/energy-dispersive-spectroscopy/>

4.2.2 Consideraciones. Los elementos que se pueden analizar con este proceso son los de número atómico mayor a 3 (a partir del berilio) hasta el uranio (con microsondas blindadas es posible analizar también elementos actínidos con un número atómico mayor que el uranio). De acuerdo a esto, elementos ligeros como H, He y Li no se pueden analizar con la microsonda. Otros elementos ligeros como el Be, B, C, O, N, F, son también difíciles de analizar debido a que se absorben fuertemente en la muestra. El Na o la Ag son difíciles de detectar con precisión debido a que pueden migrar durante la excitación del haz de electrones, obteniéndose un resultado más bajo.¹⁰⁰

¹⁰⁰ Ibíd.

En cuanto a los límites de detección, dependen de cada elemento y especialmente de las condiciones de análisis (energía y corriente del haz de electrones, tiempo de conteo, etc.), pero de forma rutinaria se trabaja bien hasta las centésimas de %.¹⁰¹

Existen algunas interferencias entre las líneas de algunos elementos, aspecto que debe tenerse en cuenta si dichos elementos existen en el mismo mineral. Por ejemplo, la interferencia de la línea $K\beta$ del Ti con la $K\alpha$ del V, de modo que si ambos elementos existen en la misma muestra el valor de concentración obtenido para el V estará sobreestimado. Existen diferentes procedimientos para minimizar el efecto de las interferencias espectrales, que incluyen la elección de otra línea de energía, en este caso por ejemplo la línea $K\beta$ del V, o la aplicación de correcciones basadas en mediciones secundarias¹⁰².

Desafortunadamente, muchos elementos producen rayos X con energías próximas a las de otros elementos y debido a la baja resolución espectral de los espectrómetros EDS, los análisis obtenidos no siempre son muy precisos pese al desarrollo reciente de software que ha mejorado los resultados. No obstante, debido a que puede trabajar con bajas corrientes de sonda, es un método muy poco destructivo, que lo convierte en imprescindible para el análisis semicuantitativo de cristales de tamaño de grano muy fino (menos de 1 μm), incluso hidratados, y en muestra rugosa. Por consiguiente, el microanálisis semicuantitativo mediante EDS es una herramienta potencial y posiblemente infrautilizada actualmente en el campo de las Ciencias de la Tierra.¹⁰³

¹⁰¹ Ibíd

¹⁰² Ibíd.

¹⁰³ Ibíd.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS APLICADOS EN GEOLOGÍA

4.3.1 Coeficiente de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación puede definirse como la asociación entre dos variables evaluadas en un número de datos, y se cuantifica usando el coeficiente de correlación lineal de producto-momento de Pearson, usualmente conocido como coeficiente de correlación.¹⁰⁴

Rollinson (1993), menciona el cálculo del coeficiente de correlación, a partir de una muestra de la población total, mediante la expresión:

$$r = \frac{\text{covarianza } (x, y)}{\sqrt{[\text{varianza } (x) \cdot \text{varianza } (y)]}}$$

Por otra parte, cuando hay n valores de la variable X (x1...xn) y de la variable Y (y1...yn), Rollinson (1993) propone una expresión más fácil para dichos cálculos, la cual se define como:

$$r = \frac{CSCP}{\sqrt{(CSSX \cdot CSSY)}}$$

Donde,

CSCP (suma corregida de productos cruzados) = $\sum(xy) - \sum(x) \cdot \sum(y)/n$

CSSX (suma corregida de cuadrados para x) = $\sum(x^2) - \sum(x) \cdot \sum(x)/n$

CSSY (suma corregida de cuadrados para y) = $\sum(y^2) - \sum(y) \cdot \sum(y)/n$

Los valores de r varían de -1 a +1. Cuando r = +1, hay una correlación perfecta entre X y Y, es decir, hay una relación lineal directa perfecta. Cuando r = -1, hay

¹⁰⁴ ROLLINSON, Op. Cit.

una correlación inversa perfecta entre X y Y. Si $r = 0$, no existe ninguna relación entre dichas variables.¹⁰⁵

En Martínez et al. (2009)¹⁰⁶, se plantean los siguientes rangos para el coeficiente de correlación:

Tabla 1. Escala de valores para el coeficiente de correlación de Pearson

Correlación negativa	Correlación positiva
0 = Nula	0 = Nula
-0.25 = Débil	0.25 = Débil
-0.50 = Media	0.50 = Media
-0.75 = Fuerte	0.75 = Fuerte
-1 = Perfecta	1 = Perfecta

Fuente: MARTÍNEZ, Rosa María; TUYA, Leonel C.; MARTÍNEZ, Mercedes; PÉREZ, Alberto; CÁNOVAS, Ana María. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. Caracterización. Revista ciencias médicas La Habana. 2009. Vol. 8, núm. 2. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v8n2/rhcm17209.pdf>

4.3.2 Análisis clúster. El análisis clúster es comúnmente conocido como una técnica matemática diseñada para la clasificación, el cual tiene como objetivo agrupar objetos que son similares y distinguirlos de otros objetos diferentes con base en sus características medidas¹⁰⁷. Este agrupamiento se basa en la idea de distancia o similitud entre las observaciones¹⁰⁸

¹⁰⁵ ROLLINSON, Op. Cit.

¹⁰⁶ MARTÍNEZ ORTEGA, Rosa María; TUYA PENDÁS, Leonel C. MARTÍNEZ ORTEGA, Mercedes; PÉREZ ABREU, Alberto; CÁNOVAS; Ana María. El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización. Instituto Superior de Ciencias Médicas de La Habana (ISCM-H). Facultad de Ciencias Médicas Dr. Enrique Cabrera. Rev haban cienc méd La Habana, Vol. VIII No. 2, Abr-Jun 2009

¹⁰⁷ DAVIS, John C. Statistics and data analysis in geology. Editorial John Wiley & Sons, Inc. United States of America. . 2002. 487 – 488 p. ISBN 0-471-17275-8.

¹⁰⁸ MARÍN DIAZARAQUE, Juan Miguel. Tema 5: Análisis de Clúster y Multidimensional Scaling. Disponible en: halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema5am.pdf. Fecha de consulta: Marzo 14 de 2017.

El tipo más común de métodos de agrupamiento utilizados en geología y otras ciencias es el análisis jerárquico¹⁰⁹.

El procedimiento es el siguiente: a una base de datos de observaciones o medidas de los objetos que se van a agrupar, se le calcula una matriz de similitudes o distancias estadísticas entre los objetos con base en sus atributos. El algoritmo de agrupamiento se aplica a la matriz de similitud como un proceso iterativo. Los pares de objetos con las similitudes más altas se unen, se vuelve a calcular la matriz y se repite el procedimiento.

El resultado final es un diagrama de árbol, denominado dendrograma (**Figura 73**). Los extremos de las ramas representan las muestras, y la altura a la que se unen las ramificaciones corresponde al nivel de similitud. Cuanto más altas se unen las ramas, más similares son las muestra¹¹⁰.

4.3.3 Análisis de componentes principales (PCA). El análisis de componentes principales (PCA) de datos geoquímicos multivariados, es una técnica que transforma un gran número de variables (por ejemplo, concentraciones de elementos de una roca) a un número menor de variables independientes que explican los datos.¹¹¹

En un PCA, el punto de partida es la matriz de covarianza entre elementos para las variables originales. Este se descompone de modo que la variabilidad de los

¹⁰⁹ KANSAS GEOLOGICAL SURVEY. Zone Kluster ("ZeKe"). A depth constrained cluster analysis description. Disponible en: <http://www.kgs.ku.edu/stratigraphic/ZONATION/description.html>. Fecha de consulta: Julio 21 de 2017

¹¹⁰ HOWARTH, R. J. Statistics and data analysis in geochemical prospecting (Handbook of exploration geochemistry; volume 2. Elsevier. Amsterdam. 1983. ISBN 0-444-41932-2.

¹¹¹ PE-PIPER, Georgia; TRIANTAFYLLIDIS, Stavros; and PIPER, David J. W. Geochemical identification of clastic sediment provenance from known sources of similar geology: the cretaceous Scotian Basin, Canada. Journal of Sedimentary Research, 2008, v. 78, 595–607.

datos puede ser representada por un conjunto de nuevas variables, las cuales no están correlacionadas entre sí.¹¹²

La suma de cargas cuadradas corresponde a la variabilidad total contabilizada para cada nueva variable, esta suma equivale a los Eigenvalues, los cuales están asociados a los Eigenvectors. Los Eigenvectors son las líneas proyectadas como biplot y corresponden a los componentes principales. Los valores propios (Eigenvalues) más grandes corresponden a los componentes principales que están asociados con la mayor parte de la covarianza del set de datos.¹¹³

El primer componente principal representa la variabilidad total de los datos, el segundo representa la varianza residual, y así sucesivamente para todos los nuevos componentes, hasta que la variabilidad total está completamente incluida.¹¹⁴

Los datos de composición química son medidas de proporciones, porcentajes, partes por millón, etc., que suman un valor constante, comúnmente del 100%, lo que hace que los datos estén cerrados.¹¹⁵ Es decir, si algún elemento aumenta su concentración otro disminuye, induciendo a medidas de correlación y presentaciones gráficas que no reflejan las verdaderas relaciones implícitas (Garrett, R). Estos datos requieren una transformación matemática conocida como Centered Log-Ratio (CLR)¹¹⁶, con el fin de eliminar la restricción por efectos de cierre, y así poder ser utilizables en el contexto estadístico del análisis de componentes principales (PCA).¹¹⁷

¹¹² HOWARTH, Op. Cit.

¹¹³ CARMONA, Francesc. Un ejemplo de ACP paso a paso. Departament d'Estadística. 13 de enero de 2014. Disponible en: <http://www.ub.edu/stat/docencia/Mates/ejemploACP.PDF>

¹¹⁴ HOWARTH, Op. Cit.

¹¹⁵ MURIITHI, Faith K. Centered Log-Ratio (clr) Transformation and Robust Principal Component Analysis of Long-Term NDVI Data Reveal Vegetation Activity Linked to Climate Processes. Department of Earth and Environmental Studies, Montclair State University, 1 Normal Avenue, Montclair. Academic Editors: Aonover Tarhule and Zewdu T. Segele Received: 14 November 2014 / Accepted: 4 January 2015 / Published: 13 January 2015.

¹¹⁶ PE-PIPER, TRIANTAFYLLIDIS, PIPER. Óp. Cit.

¹¹⁷ MURIITHI. Op. Cit.

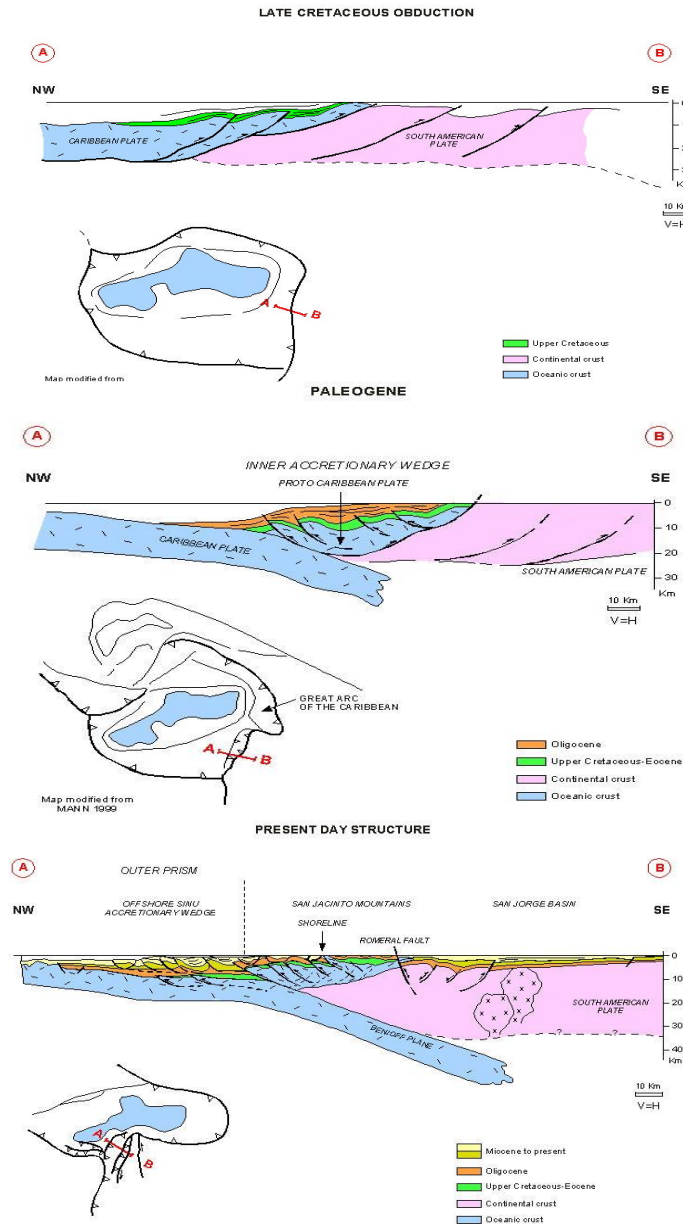
5. ANTECEDENTES

5.1 MARCO GEOLÓGICO

5.1.1 Configuración tectónica del sector NW de Colombia. La interacción entre la placa Caribe (PC) y la placa sudamericana (PSA) a través del tiempo ha sido responsable de la configuración estructural y estratigráfica del noroeste de Sudamérica. La geología de esta región resultó de la interacción entre estas dos placas, generándose una actividad transpresiva dominante en la parte noroccidental de Colombia, mientras que en su porción más septentrional se caracteriza por la actividad transformante asociada con un sistema de fallas de rumbo dextral con tendencia Este-Oeste. Este sistema se extiende hacia el E paralelo a la costa norte de Venezuela (Figura 11).¹¹⁸

¹¹⁸ ARDILA, Luis E.; DÍAZ, Leonardo; en AAPG; REPSOL; ANADARKO. Petroleum Geology and Potential of the Colombian Caribbean Margin. Memoir 108. Houston, Texas: 2015, 217 p. ISBN 13: 978-0-89181-388-0. Disponible en: <http://www.aapg.org/publications/special-publications/books/details/Articleid/21809/petroleum-geology-and-potential-of-the-colombian-caribbean-margin>

Figura 11. Una sección transversal en sentido NW-SE y un esquema paleogeográfico indican la evolución estructural del NW de Colombia desde el Cretácico Superior hasta el presente



Fuente: FLINCH, Joan; AMARAL, Joao; DOULCET, Alain; MOULY, Benoit; OSORIO, Claudia; PINCE, Jean Marc. Onshore-Offshore Structure of the Northern Colombia Accretionary Complex. AAPG International Conference (21-24 Septiembre: Barcelona, España). 2003, 1 p. Disponible en: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2003/intl/extend/ndx_83045.pdf.html?q=%252BtitleStrip%253A%2522onshore+offshore%2522+titleStrip%253Astructure+titleStrip%253Anorthern+titleStrip%253Acolombia+titleStrip%253Aaccretionary+titleStrip%253Acomplex

Para el Cretácico en el Caribe colombiano existían dos (2) dominios geológicos completamente diferentes, el primero era una zona emergida, corteza continental, como continuación de la Cordillera Central, con presencia de rocas volcanoclásticas con metamorfismo de bajo grado, cuyo límite ha sido colocado en la actual zona de sutura del sistema de fallas de Romeral; y otro, al oeste del mencionado sistema de fallas, con rocas fundamentalmente oceánicas como serpentinitas y basaltos, previo a la depositación de sedimentos finos característicos de los cinturones plegados actuales¹¹⁹. Posterior a esta etapa, la sedimentación estuvo fuertemente controlada por el proceso transpresivo desarrollado en la zona, a causa de la migración al Este de la placa Caribe y el emplazamiento del arco de Panamá. Este episodio limitó la depositación de unidades en el dominio continental y generó cuñas acrecionarias conocidas como sistema acrecionario Sinú-San Jacinto, pudiendo diferenciarse en dos zonas, donde su parte interna corresponde a la parte más antigua, Cinturón Plegado de San Jacinto, y su parte externa corresponde a la parte más joven, Cinturón del Sinú (**Figura 12**).¹²⁰

El Cinturón Plegado del Sinú (CPS) está caracterizado por un conjunto de sedimentos marinos y fosilíferos superpuestos de gran espesor, predominando sucesiones del Oligoceno y Mioceno. El rasgo más representativo de esta parte de la cuenca es el diapirismo y vulcanismo de lodo, y el desarrollo de los sinclinales caracterizando cuencas longitudinales de hundimiento¹²¹. Este prisma es catalogado Mioceno, hecho atribuido al cierre del arco de Panamá¹²².

¹¹⁹ Petroseis Ltda. Informe final de interpretación sísmica. Sinú-San Jacinto 2D 2005. Bogotá, Colombia. 2011. Disponible en: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION_2011_SINU_SAN_JACINTO_2D_2005.pdf

¹²⁰ Petroseis Ltda. Informe final de interpretación sísmica. Sinú-San Jacinto 2D 2005. Bogotá, Colombia. 2011. Disponible en: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION_2011_SINU_SAN_JACINTO_2D_2005.pdf

¹²¹ *Ibíd.*

¹²² *Ibíd.*

5.1.2 Tectonoestratigrafía

Cinturón plegado del Sinú

Los diferentes eventos tectonoestratigráficos del CPS se pueden resumir dentro de la fase de margen activo del oeste de Suramérica, asociado a una serie de pulsos durante la deformación.¹²³

Para exactitud del presente trabajo, se mencionó la evolución tectonoestratigráfica comprendida entre el Mioceno al Pleistoceno, edades que abarca la secuencia del Pozo estudiado.

- **Mioceno**

Datos de registros de pozos sugieren que la cuña de acreción del Sinú está superpuesta por cuencas piggyback del Eoceno superior al Mioceno. Durante el Mioceno, el relleno de la cuenca piggyback cambió de depósitos marinos a transicionales y finalmente a depósitos continentales. La depositación de sedimentos marino somero a depósitos continentales en el Este era contemporánea con la depositación de sedimentos marino profundo en el Oeste, en las cercanías de la línea de costa actual del mar Caribe. En este tiempo, un fuerte evento compresivo causó la inversión de las estructuras existentes en el área, produciendo erosión y depositación, lo que ocasionó también el levantamiento de la cuña de acreción del Sinú, lo cual resultó en una importante regresión o desplazamiento de las facies hacia el mar.¹²⁴

¹²³ Petroseis Ltda. 2011. Óp. Cit.

¹²⁴ FLINCH, Joan Francesc; AMARAL, Joao; DOULCET, Alain; MOULY, Benoit; OSORIO, Claudia; Pince, Jean Marc. Onshore-Offshore Structure of the Northern Colombia Accretionary Complex. AAPG International Conference. Barcelona, Spain. September 21-24, 2003

Bowlanland (1993)¹²⁵, describe este periodo como un tiempo depositacional correspondiente probablemente con el inicio del movimiento en sentido E de la Placa Caribe con respecto a la Placa suramericana; se da un cambio importante en la sedimentación traducido en la entrada de sedimentos clásticos por flujos turbidíticos (no confinados).

- **Plioceno tardío – Pleistoceno**

Fuerte evento transpresivo que lleva a la cuenca a su configuración actual, produce fallamiento rumbo-deslizante, estructuras de flor positivas, rotación de sinclinales y diapirismo de lodo emplazado a través de fallas con componente de rumbo dextral deformando algunos anticlinales¹²⁶, causado por la colisión entre el Arco de Panamá y la Placa suramericana. Durante este periodo ocurre depositación de complejos de abanicos turbidíticos (turbidity fan complexes).

- **Pleistoceno – Holoceno**

El Cinturón de Sinú continúa emergiendo debido a la compresión lateral y a las altas presiones almacenadas en éste, por lo que el vulcanismo de lodo es aún activo en esta etapa.¹²⁷

5.1.3 Estratigrafía. Hasta la fecha se encuentran muchas dificultades a la hora de adoptar un marco estratigráfico que sirva como referencia para ubicarse en la Cuenca del Sinú. Estos problemas se refieren principalmente a la falta de conocimiento en la posición estratigráfica, cronología, variación facial y dispersión geográfica de las unidades, así como de sus equivalentes laterales.¹²⁸

¹²⁵ BOWLAND, CHRISTOPHER L. Depositional history of the western Colombian Basin, Caribbean Sea, revealed by seismic stratigraphy. Geological Society of America Bulletin. June 5, 2011

¹²⁶ *Ibíd.*

¹²⁷ *Ibíd.*

¹²⁸ SIERRA, GÓMEZ, Óp. Cit.

En esta cuenca se ha utilizado una nomenclatura complicada y ajustada a lo que se observa en pozo o en superficie debido a la complejidad estratigráfica y estructural presente en el área. En cuanto a la edad de las unidades presentes, también existe confusión, ya que una misma unidad es reportada con diferentes edades por distintos autores.¹²⁹

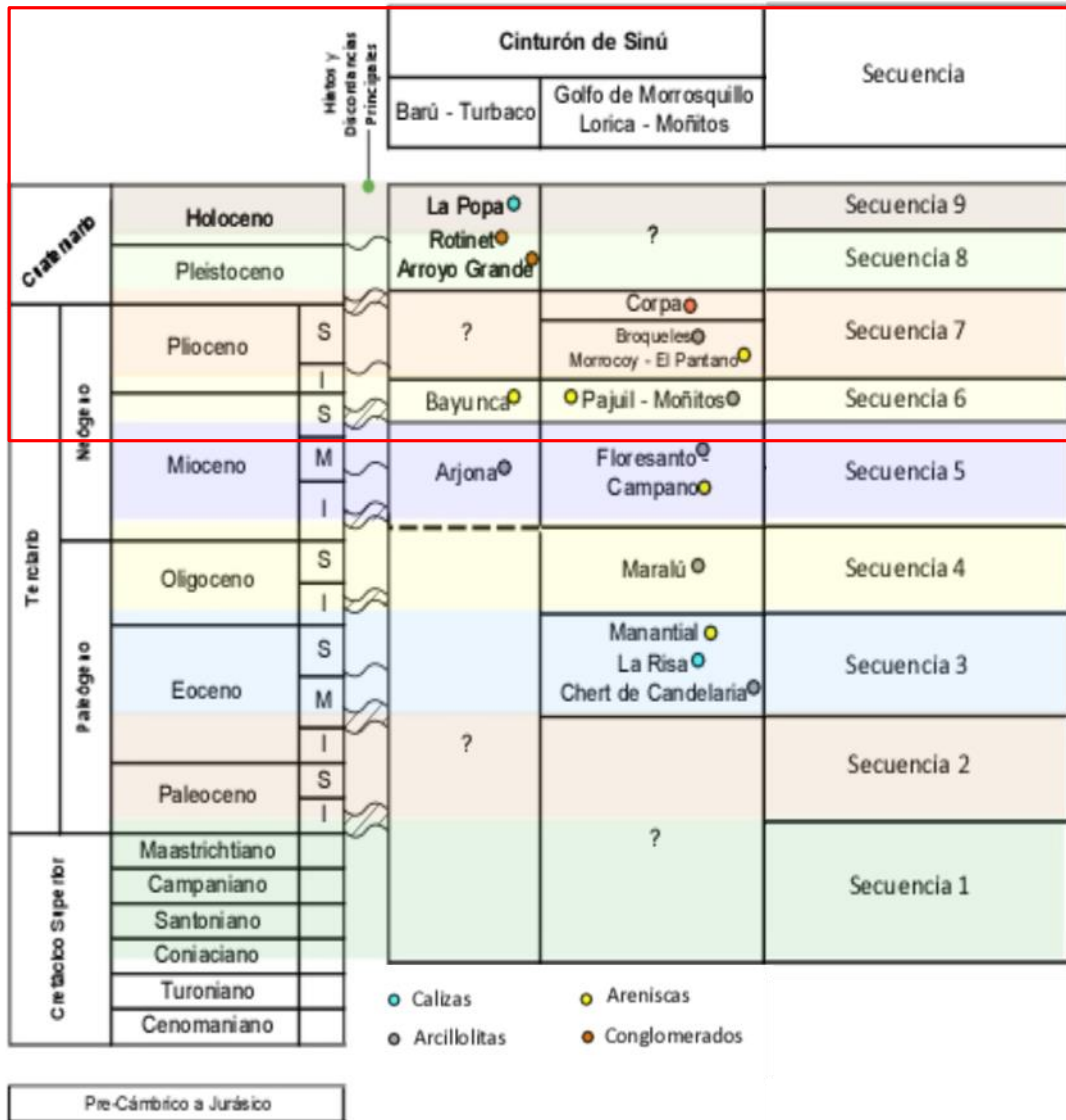
Ecopetrol en el año 2010, mediante el Instituto Colombiano del Petróleo, lideró el proyecto: “*Modelamiento geológico de áreas costa afuera para la disminución de la incertidumbre exploratoria*”, en el cual se realizó una recopilación y revisión de la información estratigráfica existente para el área del Caribe Colombiano, siendo consignada en Sierra y Gómez (2010)¹³⁰, con el propósito de plantear un marco estratigráfico que permitiera esclarecer el panorama de la zona debido a contrastes en la nomenclatura propuesta por diferentes autores, así como contradicciones en la edad de las unidades (**Figura 13**).

Para exactitud del presente trabajo, se menciona la estratigrafía comprendida entre el Mioceno tardío al Pleistoceno-Holoceno(?), edades que abarca la secuencia del Pozo estudiado.

¹²⁹ Geokinetics. Interpretación programa sísmico 2D. 2009. 17-18 p. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/S%C3%ADsmica%20Sin%C3%BA%20Sur%20D%202008.pdf>

¹³⁰ SIERRA, GÓMEZ, Óp. Cit.

Figura 13. Marco cronoestratigráfico del Cinturón de Sinú, y su equivalencia con las secuencias definidas. Se incluye a manera general la litología predominante en cada unidad/formación



Fuente: SIERRA, Jair; GÓMEZ, Pedro. Revisión de información estratigráfica y determinación del marco cronoestratigráfico para dos sectores en el norte de Colombia: Área de los cinturones plegados de Sinú y San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena. Modelamiento Geológico de Áreas Costa Afuera para la Disminución de Incertidumbre Exploratoria. Informe interno ECOPEPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2010. Modificado por la autora.

- **Secuencia 6: Mioceno Tardío a Plioceno Temprano?**

Incluye depósitos arenosos, calcáreos en ocasiones, a conglomeráticos (formaciones Bayunca y Pajuil) y lutíticos (formaciones Pajuil y Moñitos) en la parte alta del Mioceno¹³¹.

- **Secuencia 7: Plioceno Temprano a Pleistoceno Temprano?**

La sedimentación incluida dentro de esta secuencia es principalmente de origen continental y está representada por depósitos fluviales arenosos a conglomeráticos con intercalaciones menores de materiales finos: Formación Corpa. Para la Unidad Broqueles, presente exclusivamente en el sector de La Rada, se menciona que es una unidad principalmente lutítica con frecuentes intercalaciones de arenitas finas en ciclos que se interpretan como depósitos de tormentas en medios marinos someros.¹³²

- **Secuencia 8: Pleistoceno**

Está representada por unidades conglomeráticas sin aparente relación entre sí, presentes sólo en la parte norte del Cinturón de Sinú: la Formación Rotinet aflora en el sector de Turbaco y está formada por gravas inconsolidadas de origen fluvial¹³³. La Formación Arroyo Grande está constituida por gravas y areniscas poco consolidadas, pero para esta unidad se asume influencia marina.¹³⁴

- **Secuencia 9: Holoceno**

Esta secuencia está esencialmente constituida por depósitos jóvenes de extensiones locales y se encuentra representada por la Formación La Popa, la cual aflora sólo al norte del Cinturón de Sinú (desde Cartagena hasta Barranquilla), formada principalmente por calizas, también incluye sedimentos finogranulares y algunas areniscas calcáreas en su parte inferior. Las calizas de la

¹³¹ SIERRA, GÓMEZ, Óp. Cit.

¹³² Ibíd.

¹³³ Ibíd.

¹³⁴ Ibíd.

Formación La Popa son de origen arrecifal indicando un ambiente marino somero con alguna influencia continental.¹³⁵

5.2 BIOESTRATIGRAFÍA

5.2.1 Paleoambiente. El estudio bioestratigráfico del Pozo-1, fue realizado por Rincón et al., 2016, quienes hacen parte del grupo de Bioestratigrafía del ICP-ECOPETROL. Allí se consideró que el paleoambiente bajo el cual se depositó la totalidad de la secuencia sedimentaria, fue batial de talud continental medio entre los 1500 y 2000 m de profundidad, de acuerdo a la distribución y composición de los foraminíferos planctónicos y bentónicos.¹³⁶

Por otra parte, de acuerdo a los análisis palinológicos, la composición de la materia orgánica, principalmente continental y próxima a una fuente fluvial, sugiere que el ambiente de depósito de la sucesión sedimentaria es bastante somero¹³⁷. Sin embargo, se encontró que en análogos de abanicos profundos, una cantidad considerable de material orgánico terrestre alcanza hasta los lóbulos distales.¹³⁸ Evidencia del alto contenido de materia orgánica encontrada en el Pozo-1 también es hallada en el incremento de foraminíferos en los intervalos de lodolitas (2961 – 3681m y 4563 – 5169 m), especialmente en la recuperación de especímenes bentónicos infaunales y biomarcadores de productividad biológica.¹³⁹

¹³⁵ *Ibíd.*

¹³⁶ RINCÓN, Daniel; RESTREPO, Sandra; BEDOYA, Giovanni; VARGAS, María Carolina; RODRÍGUEZ, Guillermo. Bioestratigrafía integrada basada en nanofósiles calcáreos, palinología y foraminíferos de ripios del Pozo-1. Soporte técnico y caracterización de reservorios para la perforación de pozos exploratorios (Pozos VEX). Informe interno ECOPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2016.

¹³⁷ *Ibíd.*

¹³⁸ *Ibíd.*

¹³⁹ *Ibíd.*

5.3 PETROGRAFÍA

Para una mejor comprensión litoestratigráfica¹⁴⁰ del ICP-ECOPETROL, realizaron una caracterización petrográfica de 49 muestras de Side Wall Core y 66 muestras de cortes de perforación del Pozo-1, dividiendo la secuencia en tres zonas petrográficas descritas a continuación:

5.3.1 Petrofacies C: (3719 - 3795 m). Clasificación textural: se caracteriza por abundancia de arcillolitas y lodolitas bioturbadas interlaminadas con areniscas lodosas y areniscas muy finas a finas. Clasificación composicional: las areniscas se clasifican como grauwackas líticas y litoarenitas feldespáticas. Sobresale la presencia de líticos sedimentarios arcillosos, chert y en menor cantidad líticos ígneos plutónicos, volcánicos y metamórficos.¹⁴¹

5.3.2 Petrofacies B: (3807 - 4152 m). Clasificación textural: arcillolitas y lodolitas bioturbadas interlaminadas con areniscas lodosas y areniscas líticas de grano fino a muy fino. Se distingue de la petrofacies C por presentar una mayor proporción de feldespatos. Clasificación composicional: las areniscas se clasifican como litoarenitas feldespáticas, con presencia de líticos sedimentarios arcillosos, chert y en menor cantidad líticos volcánicos, plutónicos y metamórficos. La ocurrencia de bioclastos se presenta en contenidos de 0 a 4.4 %; sobresale el aumento de foraminíferos (hasta 22%) en la profundidad 3876.3 m.¹⁴²

¹⁴⁰ NARANJO, Julián; PARRA, Carlos; JEREZ, Edith; MEZA, Jorge. Caracterización petrográfica de muestras de Side Wall Core y cortes de perforación en el Pozo-1. Informe interno ECOPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2015.

¹⁴¹ *Ibíd.*

¹⁴² *Ibíd.*

5.3.3 Petrofacies A: (5205 – 5844 m). Clasificación textural: predomina la granulometría arena fina a media con baja meteorización, adicionalmente se identifican partículas con tamaños hasta arena muy gruesa. Clasificación oposicional: predominan las areniscas grauwackas feldespáticas, en menor proporción se encuentran litologías como arcosas - subarcosas, lodolitas feldespáticas y arcillolitas. En esta petrofacies aumenta el contenido de fragmentos líticos ígneos plutónicos y volcánicos, plagioclasas, hornblendas, anfíboles y biotitas¹⁴³.

Las muestras de roca analizadas en el Pozo-1 para este intervalo, presentan un contrastante cambio composicional y textural, lo que la diferencia del resto de la secuencia estratigráfica analizada. Según Naranjo et al. (2015) ¹⁴⁴, estas características podrían estar asociadas con un cambio en la proveniencia de los sedimentos o con un límite de secuencia estratigráfica.

5.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS-X (DRX)

Se solicitó el análisis DRX de 13 muestras del Pozo-1, al laboratorio de rayos X-Guatigüará de la Universidad Industrial de Santander, donde se hizo un análisis tanto cualitativo como cuantitativo de las fases cristalinas presentes en dichas muestras. A continuación, se presentan las tablas reportadas por el laboratorio, equivalentes a cada espécimen analizado, los cuales corresponden a muestras de roca que han pasado por la etapa uno (1) de la metodología desarrollada en el presente proyecto (**ver sección 7.1.**) (para ver el informe completo, diríjase al **anexo A**).

¹⁴³ *Ibíd.*

¹⁴⁴ *Ibíd.*

- 2673 m.

Figura 14. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EX con profundidad 2673 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-85-1054	Cuarzo	38,6%
	(Na _{0.98} Ca _{0.02})(Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	010-70-3752	Albita	14,3%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	010-74-1784	Caolinita-1A	13,3%
	(Mg _{11.148} Fe _{0.852})((Si _{4.99} Al _{3.01})O ₂₀ (OH) ₁₆)	010-75-8790	Clinocloro	4,1%
	(K _{0.93} Na _{0.052})(Al _{1.718} Fe _{0.149} Mg _{0.099} Ti _{0.02} Mn _{0.02})(Si _{3.055} Al _{0.945})O ₁₀ (OH) ₂	010-82-3723	Moscovita-2M1	19,9%
	K ₂ Ca ₂ (Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂)(H ₂ O) ₁₂	010-76-2795	Phillipsita-Ca	3,0%
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-29-1487	Halloysita-7Å	*N.C
	Ca ₂ Mg ₄ (Al, Fe +3)Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂	010-89-7282	Magnesiohornblenda	N.C
	K(AlSi ₃ O ₈)	010-76-6582	Microclina	4,7%
	Al(OH) ₃	010-76-1782	Gibbsita	1,9%
	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	010-74-1732	Vermiculita -2M	0,3%
	Na _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 2859 m.

Figura 15. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EZ con profundidad 2859 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-1054	α -Cuarzo	34,4%
	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8\text{)}$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	11,5%
	$(\text{K}_{0.86}\text{Na}_{0.01}\text{Ca}_{0.04})(\text{Al}_{1.86}\text{Fe}_{0.04}\text{Mg}_{0.08}\text{Cr}_{0.06})(\text{Si}_{3.11}\text{Al}_{0.89})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-82-3727	Moscovita 2MI	31,2%
	$(\text{Mg}_{11.148}\text{Fe}_{0.852})(\text{Si}_{4.99}\text{Al}_{3.01})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$	010-75-8790	Clinocloro	4,2%
	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	010-74-1784	Caolinita-1A	16,3%
	$\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{Al Si}_3\text{ O}_8$	010-83-1895	Microclina	1,6%
	$\text{Ca}_{0.1}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}_{0.57}(\text{CO}_3)$	010-80-0502	Siderita magnesiada y cálcica	0,5%
	Ca CO_3	010-72-1652	Calcita	N.C
	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-74-1732	Vermiculita	0,4%
	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al, Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	000-29-1498	Montmorillonita-15Å	*N.C
Fe S_2	010-75-6907	Pirita	N.C	

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 3033 m.

Figura 16. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FG con profundidad 3033 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-85-0796	Cuarzo	39,9%
	(Mg _{11.148} Fe _{0.852}) ((Si _{4.99} Al _{3.01}) O ₂₀ (OH) ₁₆)	010-75-8790	Clinocloro	12,3%
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	17,3%
	K _{0.96} Na _{0.04} Al Si ₃ O ₈	010-83-1895	Microclina	2,4%
	(K _{0.87} Na _{0.06}) (Al _{1.7} Fe _{0.3} Mg _{0.02} Mn _{0.03} Ti _{0.02}) (Si _{3.19} Al _{0.81}) O ₁₀ (OH) ₂	010-82-3720	Moscovita 2M1	14,0%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	010-80-0886	Caolinita-1Å	13,2%
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-13-0375	Halloysita	*N.C
	Ti O ₂	010-75-2546	Anatasa	N.C
	Ca C O ₃	010-72-1652	Calcita	0,5%
	Fe S ₂	010-71-3840	Pirita	0,3%
	Na _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · xH ₂ O	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 3177 m.

Figura 17. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FB con profundidad 3177 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-1054	α -Cuarzo	38,6%
	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8\text{)}$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	13,5%
	$(\text{K}_{0.86}\text{Na}_{0.01}\text{Ca}_{0.04})(\text{Al}_{1.86}\text{Fe}_{0.04}\text{Mg}_{0.08}\text{Cr}_{0.06})(\text{Si}_{3.11}\text{Al}_{0.89})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-82-3727	Moscovita 2M1	27,5%
	$(\text{Mg}_{11.148}\text{Fe}_{0.852})((\text{Si}_{4.99}\text{Al}_{3.01})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	2,7%
	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	010-74-1784	Caolinita-IA	14,7%
	$\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{Al Si}_3\text{ O}_8$	010-83-1895	Microclina	1,5%
	Ca C O_3	010-83-0578	Calcita	0,1%
	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-74-1732	Vermiculita	0,3%
	$\text{Ca}_{0.1}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}_{0.57}(\text{C O}_3)$	010-80-0502	Siderita magnesiana y cálcica	1,1%
	Fe S_2	010-71-2219	Pirita	N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 3393 m.

Figura 18. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FA con profundidad 3393 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-0796	Cuarzo	48,0%
	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8\text{)}$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	13,1%
	$(\text{Mg}_{11.148}\text{Fe}_{0.852})((\text{Si}_{4.99}\text{Al}_{3.01})\text{O}_{20}(\text{O H})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	10,0%
	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{O H})_4$	010-74-1784	Caolinita-1A	15,7%
	$(\text{K}_{0.86}\text{Na}_{0.01}\text{Ca}_{0.04})(\text{Al}_{1.86}\text{Fe}_{0.04}\text{Mg}_{0.08}\text{Cr}_{0.06})(\text{Si}_{3.11}\text{Al}_{0.89})\text{O}_{10}(\text{O H})_2$	010-82-3727	Moscovita-2M1	11,8%
	$\text{K (Al Si}_3\text{ O}_8\text{)}$	010-76-6582	Microclina	1,2%
	$\text{Ca (C O}_3\text{)}$	010-72-1214	Calcita	N.C
	Fe S_2	010-71-3840	Pirita	0,2%
	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	000-02-0233	Halloysita	*N.C
	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al, Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{O H})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 3855 m.

Figura 19. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EW con profundidad 3855 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-85-0796	Cuarzo	37,5%
	(Mg _{11.148} Fe _{0.852}) ((Si _{4.99} Al _{3.01}) O ₂₀ (OH) ₁₆)	010-75-8790	Clinocloro	13,3%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	010-74-1784	Caolinita-1A	19,8%
	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	010-70-3752	Albita	14,6%
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6429	Albita tratada térmicamente	N.C
	K (Al Si ₃ O ₈)	010-76-6582	Microclina	1,3%
	Ca (C O ₃)	010-83-0578	Calcita	0,4%
	(K _{0.79} Na _{0.04} Ca _{0.03}) (Al _{1.84} Fe _{0.07} Mg _{0.1}) (Si _{3.16} Al _{0.84}) O ₁₀ (OH) ₂	010-82-3724	Moscovita-2M1	12,7%
	Fe S ₂	010-71-2219	Pirita	N.C
	Na _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · xH ₂ O	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C
Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	010-74-1732	Vermiculita -2M	0,4%	

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 4050 m.

Figura 20. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EY con profundidad 4050 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-0796	Cuarzo	35,1%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	14,5%
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{OH})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	17,3%
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	010-74-1784	Caolinita-1A	14,5
	$(\text{K}_{0.79} \text{Na}_{0.04} \text{Ca}_{0.03}) (\text{Al}_{1.84} \text{Fe}_{0.07} \text{Mg}_{0.1}) (\text{Si}_{3.16} \text{Al}_{0.84}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-82-3724	Moscovita-2M1	18,0%
	$\text{Ca (C O}_3)$	010-83-0578	Calcita	N.C
	$\text{K (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	010-76-6582	Microclina	0,7%
	$\text{Na}_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 4305 m.

Figura 21. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FF con profundidad 4305 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-79-1906	Cuarzo	32,9%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	010-73-9850	Albita	14,5%
	$(\text{K}_{0.87} \text{Na}_{0.06}) (\text{Al}_{1.7} \text{Fe}_{0.3} \text{Mg}_{0.02} \text{Mn}_{0.03} \text{Ti}_{0.02}) (\text{Si}_{3.19} \text{Al}_{0.81}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-82-3720	Moscovita 2M1	16,8%
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{OH})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	11,9%
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	010-80-0886	Caolinita-1Å	21,4%
	$\text{Ca (C O}_3)$	010-86-2334	Calcita	0,8%
	Fe S_2	010-75-6907	Pirita	N.C
	$\text{Na}_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-60-1517	Halloysita-14Å	*N.C
	$\text{K (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	010-76-1238	Microclina	N.C
	$\text{Ca Mn (Si}_2 \text{O}_6)$	010-79-5936	Johannsenita	1,5%
	$\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-74-1732	Vermiculita -2M	0,3%

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 4536 m.

Figura 22. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FE con profundidad 4536 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-86-1560	Cuarzo	29,1%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8 \text{)}$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	14,7%
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{ Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{ Al}_{3.01}) \text{ O}_{20} (\text{O H})_{16})$	010-75-8789	Clinocloro-IIb-2	16,1%
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{ O}_5) (\text{O H})_4$	010-80-0885	Caolinita-1A	20,4%
	$\text{Ca (C O}_3 \text{)}$	010-76-2712	Calcita	1,4%
	$\text{K (Al Si}_3 \text{ O}_8 \text{)}$	010-76-6582	Microclina	3,3%
	$(\text{K}_{0.82} \text{ Na}_{0.18}) (\text{Fe}_{0.03} \text{ Al}_{1.97}) (\text{AlSi}_3) \text{ O}_{10} (\text{O H})_2$	010-80-0742	Moscovita-2M1	12,1%
	Fe S_2	010-71-2219	Pirita	1,2%
	$\text{Mg}_{2.44} \text{ K}_{0.52} (\text{Al}_{6.3} \text{ Si}_{9.7} \text{ O}_{32}) (\text{H}_2 \text{ O})_{16}$	010-73-6747	Phillipsita	1,8%
	$\text{Al}_2 \text{ O}_3 \cdot 2 \text{ Si O}_2 \cdot x \text{ H}_2 \text{ O}$	000-02-0233	Halloysita	*N.C
$(\text{Ca , Na})_{0.3} \text{ Al}_2 (\text{Si , Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{O H})_2 \cdot x \text{ H}_2 \text{ O}$	000-60-0318	Montmorillonita	*N.C	

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 4929 m.

Figura 23. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3EV con profundidad 4929 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-1054	Cuarzo	23,8%
	Fe S_2	010-71-4470	Pirita	3,1%
	$\text{Ca (C O}_3 \text{)}$	010-83-0578	Calcita	2,9%
	$(\text{K}_{0.99} \text{Na}_{0.01}) (\text{Al}_{1.65} \text{Fe}_{0.29} \text{Ti}_{0.01} \text{Mn}_{0.07}) (\text{Si}_{3.3} \text{Al}_{0.7}) \text{O}_{10} (\text{O H})_2$	010-82-3733	Moscovita-2M1	18,3%
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{O H})_4$	010-74-1784	Caolinita-1A	11,9%
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{O H})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	16,2%
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02}) (\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3752	Albita	21,5%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8 \text{)}$	010-89-6426	Albita tratada térmicamente	N.C
	$\text{K}_{0.96} \text{Na}_{0.04} \text{Al Si}_3 \text{O}_8$	010-83-1895	Microclina	N.C
	$\text{Ba (S O}_4 \text{)}$	010-73-6401	Barita	2,2%
	$\text{Ca}_{0.1} \text{Mg}_{0.33} \text{Fe}_{0.57} (\text{C O}_3)$	010-80-0502	Siderita magnesiana cálcica	N.C
	$(\text{Mg}_{0.64} \text{Ca}_{0.936}) (\text{C O}_3)$	010-86-2335	Calcita magnesiana	N.C
	$\text{Na}_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	000-58-2011	Montmorillonita	*N.C
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$	000-60-1517	Halloysita	*N.C
	$\text{K}_2 \text{Ca}_2 (\text{Al}_6 \text{Si}_{10} \text{O}_{32}) (\text{H}_2 \text{O})_{12}$	010-76-2795	Phillipsita-Ca	N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 5199 m.

Figura 24. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FD con profundidad 5199 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-85-0796	Cuarzo	25,2%
	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8)$	010-89-6424	Albita tratada térmicamente	13,3%
	$(\text{K}_{0.87}\text{Na}_{0.06})(\text{Al}_{1.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Mg}_{0.02}\text{Mn}_{0.03}\text{Ti}_{0.02})(\text{Si}_{3.19}\text{Al}_{0.81})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-82-3720	Moscovita 2M1	18,6%
	$(\text{Mg}_{11.148}\text{Fe}_{0.852})((\text{Si}_{4.99}\text{Al}_{3.01})\text{O}_{20}(\text{OH})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	3,7%
	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	010-74-1784	Caolinita-1A	11,4%
	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	010-74-1732	Vermiculita	1,3%
	$\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{Al Si}_3\text{O}_8$	010-83-1895	Microclina	6,6%
	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al, Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	000-29-1498	Montmorillonita-15Å	*N.C
	Ca C O_3	010-72-1651	Calcita	2,2%
	$\text{Ca}_{0.1}\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}_{0.57}(\text{C O}_3)$	010-80-0502	Siderita magnesiana y cálcica	0,2%
	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	010-81-9524	Halloysita	8,8%
	$\text{Ba (S O}_4)$	010-80-0512	Barita	2,1%
	Fe S_2	010-71-3840	Pirita	0,2%
	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8)$	010-83-1605	Albita	6,4%

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 5619 m.

Figura 25. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FH con profundidad 5619 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O_2	010-86-1630	Cuarzo	32,9%
	Fe S_2	010-71-4470	Pirita	1,0%
	Ca C O_3	010-83-0578	Calcita	1,3%
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02}) (\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3752	Albita	12,5%
	$\text{K Al}_{2.9} \text{Si}_{3.1} \text{O}_{10} (\text{O H})_2$	010-84-1303	Moscovita calentada	26,2%
	$(\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}) ((\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{O H})_{16})$	010-75-8790	Clinocloro	4,5%
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{O H})_4$	010-80-0886	Caolinita-1 Å	20,0%
	$\text{Na}_{0.3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	000-58-2011	Montmorillonita	*N.C
	$\text{Ba} (\text{S O}_4)$	010-80-0512	Barita	1,5%
	$\text{K} (\text{Al Si}_3) \text{O}_8$	010-76-1238	Microclina	N.C

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

- 5859 m.

Figura 26. Fases cristalinas identificadas en la muestra E3FC con profundidad 5859 m.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Si O ₂	010-85-0504	Cuarzo	33,2%
	(Na _{0.84} Ca _{0.16}) Al _{1.16} Si _{2.84} O ₈	010-76-0927	Albita cálcica	7,2%
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-83-1606	Albita	9,3%
	(Na _{0.07} K _{0.90} Ba _{0.01}) (Al _{1.84} Ti _{0.04} Fe _{0.07} Mg _{0.04}) (Si _{3.02} Al _{0.98}) O ₁₀ (OH) ₂	010-82-2450	Moscovita-2M1	17,9%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	010-80-0885	Caolinita-1A	21,4%
	(Mg _{11.148} Fe _{0.852}) ((Si _{4.99} Al _{3.01}) O ₂₀ (OH) ₁₆)	010-75-8790	Clinocloro	9,1%
	Na _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · xH ₂ O	000-13-0259	Montmorillonita-14Å	*N.C
	K (Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	010-77-0135	Microclina	N.C
	Ca (C O ₃)	010-83-0578	Calcita	0,5%
	Fe S ₂	010-71-4470	Pirita	0,3%
	Ca (C O ₃)	010-80-2807	Calcita	N.C
	(Mg _{2.36} Fe _{0.48} Al _{0.16}) Mg _{0.32} (Al _{1.28} Si _{2.72}) O ₁₀ (OH) ₂ (H ₂ O) _{4.32} Mg _{0.32}	010-77-0022	Vermiculita-2M	1,1%

Notas:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) es (son) identificada(s) pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

*N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero no hay un modelo en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. 2017.

7. METODOLOGÍA

El proceso que se llevó a cabo para desarrollar el proyecto abarcó desde la recolección de las muestras, su preparativa y procesamiento químico, la adquisición de los espectros en el equipo, la organización de los datos generados y su análisis estadístico (**Figura 27**).

Según lo anterior, la metodología se dividió en cuatro grandes fases:

1. Preparativa de las muestras

1.1. Muestreo

1.2. Lavado

1.3. Secado

1.4. Tamizaje

1.5. Picado

1.6. Pulverizado

2. Procesamiento químico de las muestras

2.1. Remoción de carbonatos

2.2. Remoción de silicatos

2.3. Separación de la materia orgánica e inorgánica

2.4. Secado

2.5. Pulverizado

3. Adquisición de los datos mediante la técnica EDS

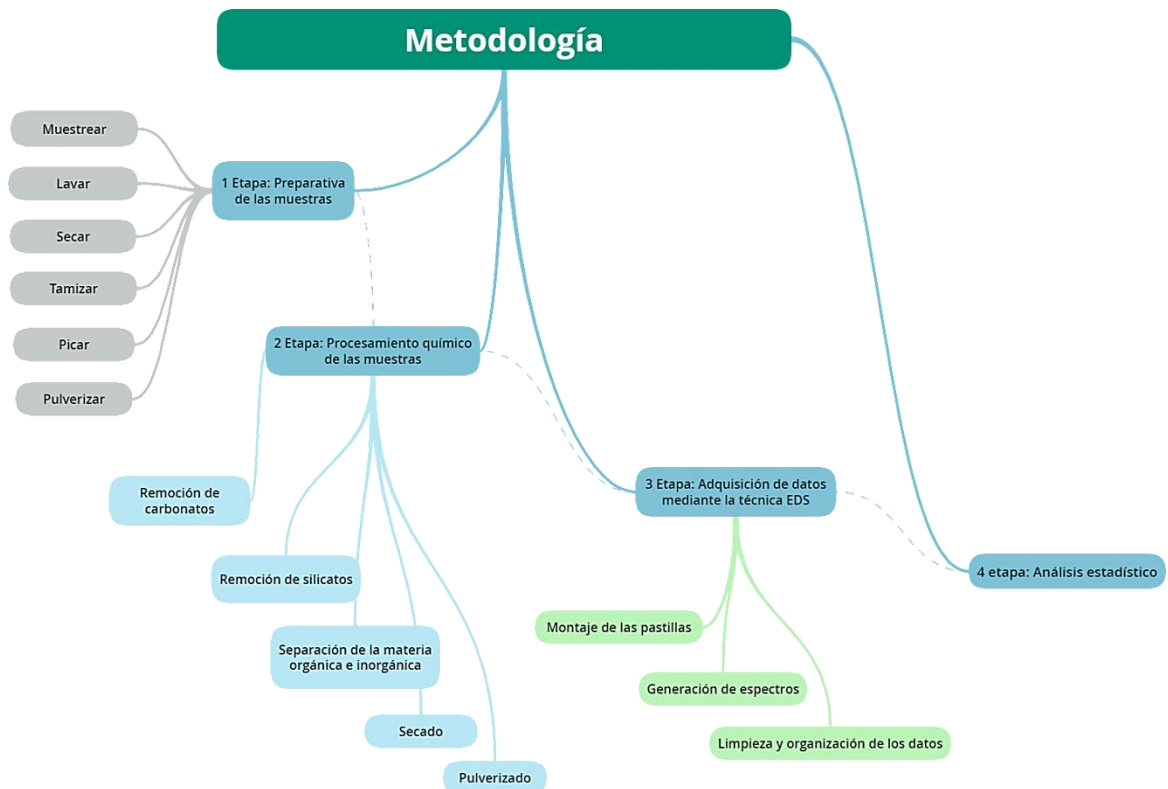
3.1. Montaje en pastilla

3.2. Generación de espectros

3.3. Organización de los datos

4. Análisis estadístico

Figura 27. Esquema correspondiente a las etapas de la metodología aplicada.



Para generar la lectura de elementos mayores y menores-traza (etapa 3.2.), fue necesario dividir la porción de la muestra en dos, de tal modo que la fracción utilizada para leer los elementos mayores pasara por las fases 1,3 y 4, mientras que, para poder adquirir los elementos menores y traza, la muestra tuvo que pasar por todas las fases anteriormente mencionadas (1,2,3 y 4).

7.1 PREPARATIVA DE LAS MUESTRAS

7.1.1 Toma de muestras. Inicialmente se realizó la recolección de los cortes de perforación del Pozo-1 ubicado en la Litoteca Ecopetrol – Instituto Colombiano del Petróleo. Los intervalos se tuvieron en cuenta de acuerdo al reporte del Departamento de Operaciones Geológicas de Exploración, quienes fueron los encargados de indicar el rango de profundidades confiables para muestrear. Teniendo en cuenta esta información, se seleccionaron las profundidades a recolectar (aproximadamente cada 70 metros de manera sistemática).

En total se tomaron 62 muestras a partir de zanja seca, pesando alrededor de 80 a 100 gramos. El intervalo muestreado comprendió las profundidades entre 2239 m y 5875 m (**Figura 28**).

Figura 28. Etapa de toma de muestras del Pozo-1. Litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo.



7.1.2 Lavado y secado. Las muestras fueron llevadas a un proceso de lavado con una solución 70% diclorometano y 30% metanol. En un recipiente debidamente marcado se añadió la muestra para luego adicionar la solución hasta cubrirla. Con la ayuda de un agitador se consiguió mezclar y luego se dejó reposar la muestra durante 5 minutos para lograr que la solución diluyera los residuos del lodo de perforación. El paso anterior se repitió entre 10 a 15 veces hasta conseguir que la solución resultara sin trazas de residuos.

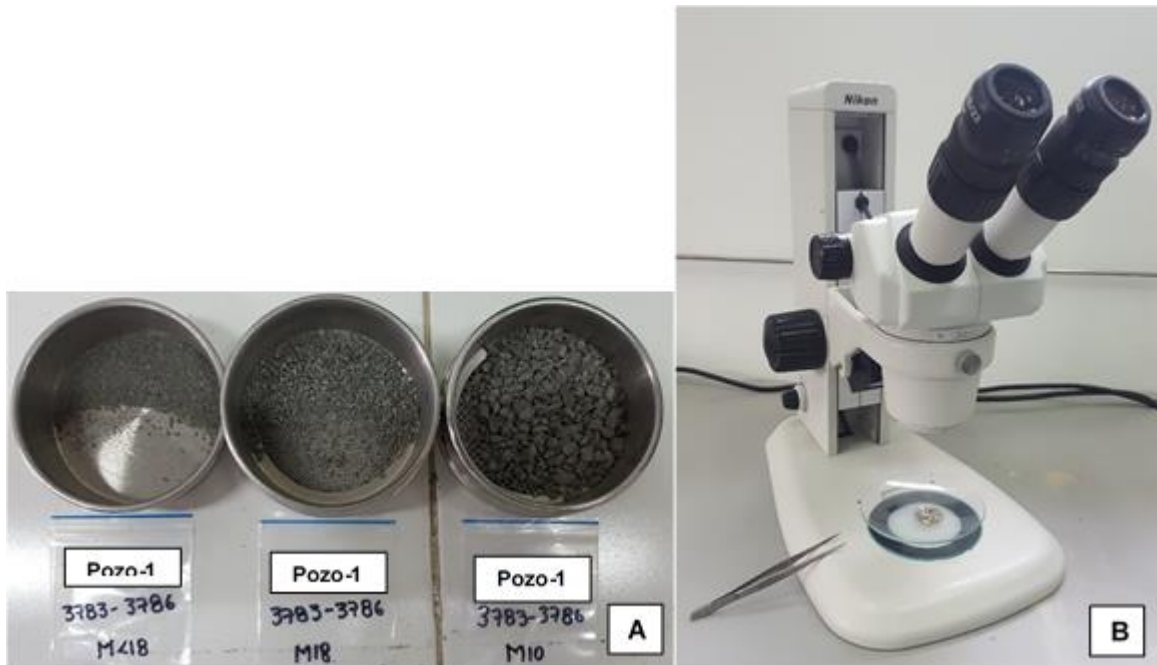
Al terminar el lavado, las muestras fueron llevadas en sus respectivos recipientes a un horno (45°C) durante un día con el fin de garantizar el secado total (**Figura 29**).

Figura 29. Proceso de lavado (A) y secado (B) de las muestras seleccionadas del Pozo-1.



7.1.3 Tamizaje y picado. Luego de estar completamente secas las muestras se realizó el tamizaje de cada una de ellas utilizando mallas de 10, 18 y <18 (**Figura 30.A**), donde los granos resultantes tras pasar por la malla <18 fueron los llevados a la etapa de picking (**Figura 30.B**). Este paso permitió eliminar de la muestra todo lo correspondiente a aditivos del lodo de perforación.

Figura 30. Proceso de tamizaje (A) y picking (B) de las muestras seleccionadas del Pozo-1.



7.1.4 Pulverizado. El último paso de la primera fase consistió en el pulverizado de las muestras. Cada una de ellas se depositó en un mortero eléctrico de ágata por tres minutos hasta obtener una muestra totalmente fina y homogénea, luego la muestra fue pasada por un tamiz malla 60 (250 μm) y finalmente fue almacenada de nuevo en su bolsa original. Después de cada pulverizada fue importante limpiar y lavar el mortero con una solución de ácido nítrico al 5% durante diez segundos, en seguida se purgó con agua destilada tipo I y fue secado con el sistema de aire comprimido. Todo lo anterior se realizó con el fin de evitar trazas de contaminación cada vez que se realizara el pulverizado de una nueva muestra (**Figura 31**).

Figura 31. Proceso de pulverizado de las muestras seleccionadas del Pozo-1.



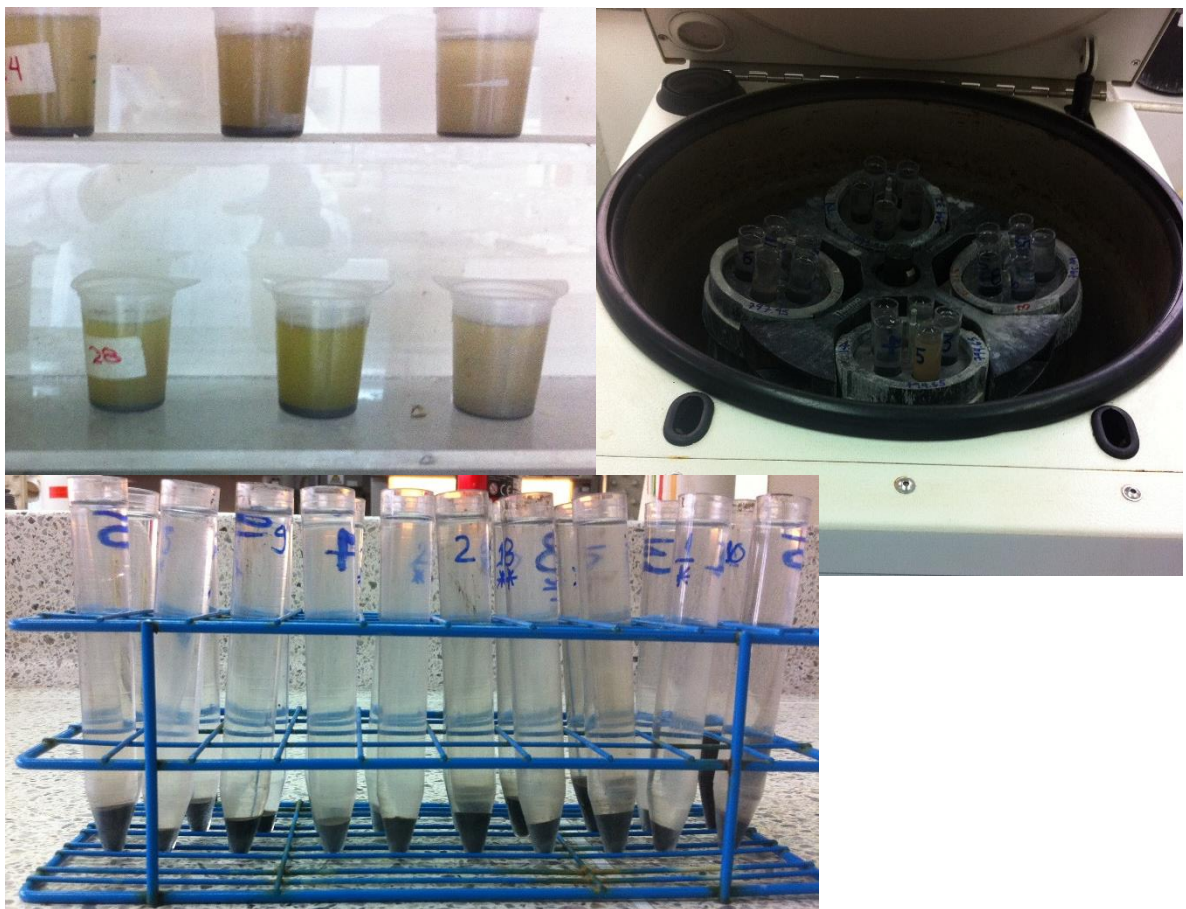
7.2 PROCESAMIENTO QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

Para este procesamiento se tomó como guía el instructivo GTN-I-1122 (Instructivo para el análisis mineralógico integrado por DRX, SEM-EDX y petrología convencional) del laboratorio de procesamiento de muestras geológicas del ICP.

7.2.1 Remoción de carbonatos. De cada muestra se pesó entre 1 a 2 gramos en un beaker debidamente marcado de acuerdo al número de la misma; fueron llevados a una cabina extractora donde se les adicionó ácido clorhídrico (HCL) al 37% a cada muestra hasta cubrirla, dejando actuar la reacción por 1 hora con el fin de eliminar los carbonatos y lograr la decantación de la muestra.

Posterior a este tiempo, se vertió dicho contenido en un tubo cónico de 100 ml, se adicionó agua destilada hasta el tope y se llevó a centrifugado a 2000 rpm durante 5 minutos. Luego se evacuó del recipiente la solución de HCL + agua destilada teniendo precaución de no dejar perder muestra. Este paso se realizó tres veces con el propósito de neutralizar el HCL contenido en el sedimento (**Figura 32**).

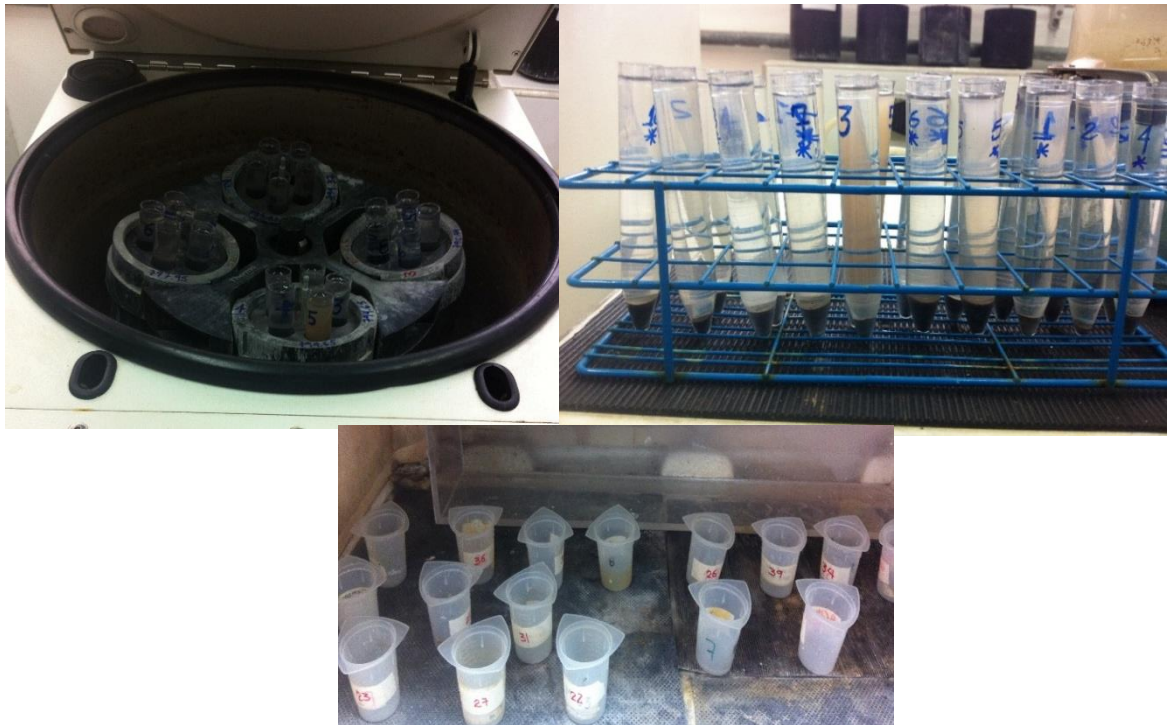
Figura 32. Proceso de remoción de carbonatos de las muestras seleccionadas del Pozo-1.



7.2.2 Remoción de silicatos. Posterior a la eliminación de los carbonatos la muestra fue regresada a su respectivo beaker (debidamente limpio) para poder añadir la cantidad necesaria de ácido fluorhídrico (HF) al 40% hasta cubrirla. La reacción se dejó actuar y decantar por 15 horas para remover los silicatos, con el fin de evitar interferencias en la lectura de los elementos menores y traza.

Pasado este tiempo, se vertió la muestra acidificada en un tubo cónico de 100 ml, se agregó agua destilada hasta el tope y se llevó a centrifugado por 5 minutos a 2000 rpm. Después se evacuó del recipiente la solución de HF + agua destilada teniendo precaución de no dejar perder muestra. Para neutralizarla fue necesario repetir este procedimiento tres veces más, para un total de cuatro neutralizadas (Figura 33).

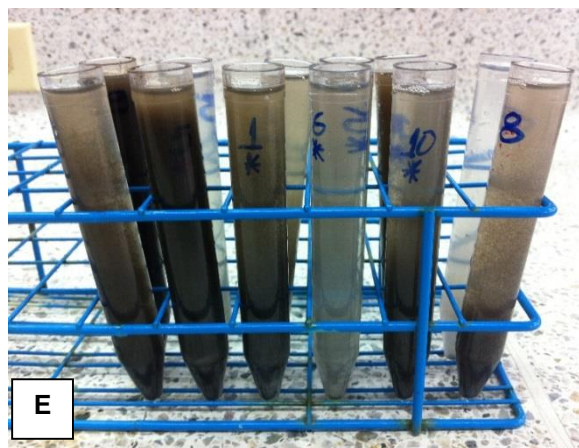
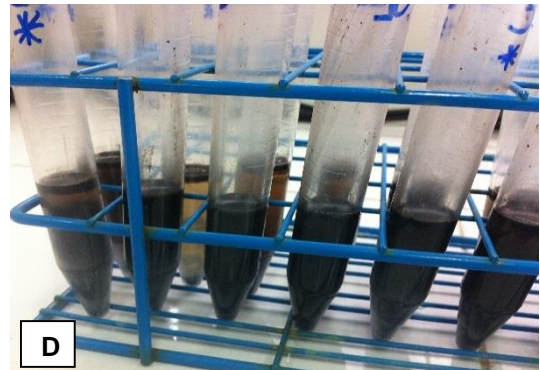
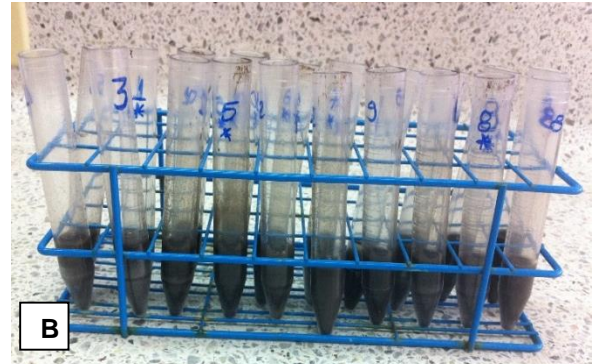
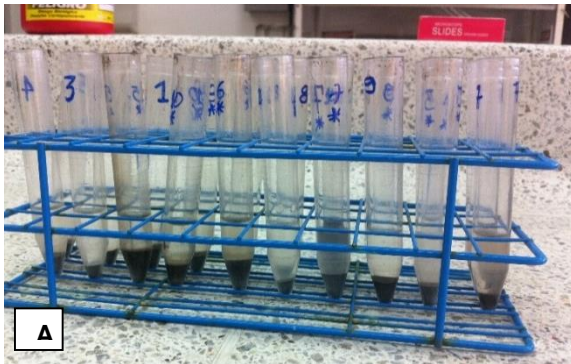
Figura 33. Proceso de remoción de silicatos de las muestras seleccionadas del Pozo-1.



7.2.3 Separación del material orgánico e inorgánico. A la muestra acumulada en el tubo cónico, después de la anterior neutralizada, se le agregó Cloruro de Zinc (ZnCl_2) en una proporción 3:1 (Figura 36.A) y se mezcló con un agitador tipo vórtex hasta conseguir una sola fase sin formación de grumos (Figura 36.B). Dichos tubos fueron luego llevados a centrifugado por 20 minutos a 2600 rpm (Figura 36.C). Transcurrido este tiempo, ocurrió el fraccionamiento de la muestra por efectos de diferencia de densidades, lo que permitió la formación de un anillo de materia orgánica en la parte superior (**Figura 34.D**).

El anillo se descartó y el material inorgánico concentrado en el fondo del tubo se sometió a lavado con agua destilada, procurando agitar con la ayuda de una espátula y el agitador eléctrico hasta conseguir nuevamente una mezcla homogénea sin formación de grumos (**Figura 34.E**). Los tubos cónicos fueron de nuevo llevados a centrifugado, esta vez por 5 minutos a 2000 rpm, repitiendo este paso tres veces más con el fin de eliminar el ZnCl_2 concentrado.

Figura 34. A. $ZnCl_2$ (cloruro de zinc de 2.0 g/ml) en una proporción 3:1. B. Mezcla homogénea sin formación de grumos. C. Centrifugado por 20 minutos a 2600 rpm. D. Fraccionamiento de la muestra por efectos de diferencia de densidades, separando la materia orgánica (anillo en la parte superior) de la inorgánica. E. Lavado con agua destilada para eliminar el $ZnCl_2$.



7.2.4 Secado y pulverizado. La muestra acumulada en el fondo de cada tubo, luego de la última centrifugada, se depositó en una caja Petri y se llevó a secado en horno (60 ° C) hasta que se evaporó todo el residuo líquido (**Figura 35**). Finalmente, la muestra pasó por una última pulverizada convirtiendo el sedimento en un polvo fino.

Figura 35. Muestras dispuestas en cajas Petri para llevar al horno.



7.3 ADQUISICIÓN DE LOS DATOS MEDIANTE LA TÉCNICA ANALÍTICA EDS

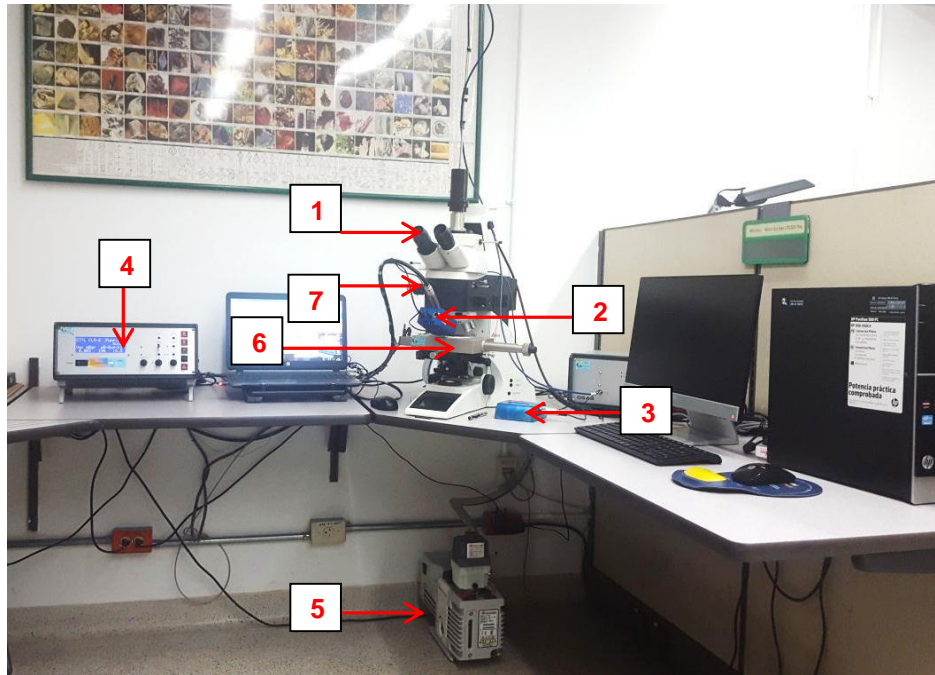
7.3.1 Montaje de la muestra en pastilla. Finalizados los procedimientos anteriores la muestra estuvo lista para realizar su respectivo montaje. Para esto, una porción mínima fue dispuesta en una prensa manual con el fin de lograr su compactación en forma de pastilla. Posteriormente, en un cubreobjetos se ubicó una etiqueta adhesiva y a ésta se fijó la pastilla (**Figura 36**). Terminado dicho paso la muestra estuvo lista para ser corrida en el equipo.

Figura 36. Instrumentación para la elaboración de las pastillas y su respectivo almacenamiento.



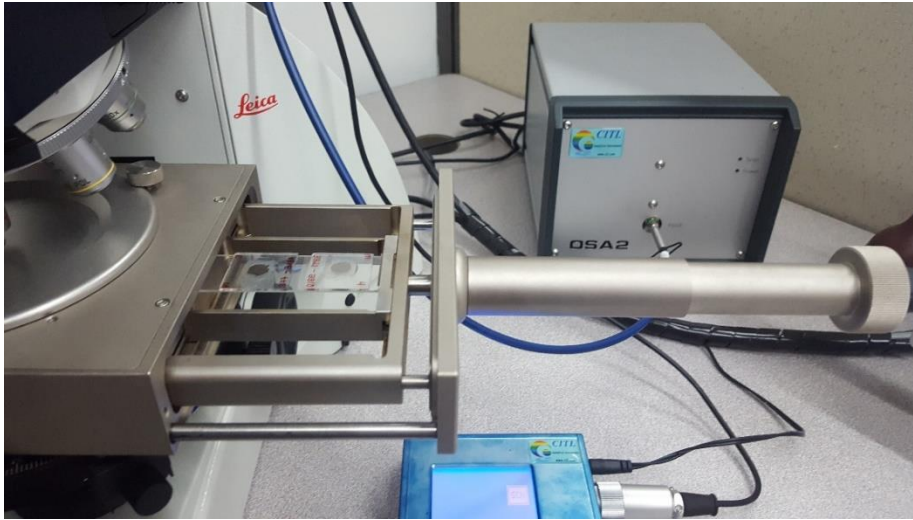
7.3.2 Lectura de elementos químicos. Esta actividad fue realizada por la estudiante bajo la supervisión del Laboratorio de Petrografía del Instituto Colombiano del Petróleo – Ecopetrol, quienes brindaron la capacitación requerida para el manejo del equipo (**Figura 37**).

Figura 37. 1. Microscopio petrográfico Leica-DM4500 P LED. 2. Sonda CL5 EDX. 3. Sistema de activación del cañón de electrones. 4. Unidad de control - Sistema óptico de catodoluminiscencia CL8200 MK5-2. 5. Bomba de vacío EDWARDS. 6. Cámara de vacío. 7. Cañón de electrones.



Antes de comenzar a utilizar el equipo se adecuó en la platina (cámara de vacío) la lámina que contenía las dos pastillas (**Figura 38**), ya que después de encendido no es posible pues se genera el vacío. La pastilla fue situada justo en el enfoque del ocular del microscopio (dicha posición se logró girando la perilla de la platina), debido a que en esta orientación es direccionado el haz de electrones.

Figura 38. Postura en la platina de las pastillas contenidas en la lámina.



Para iniciar con la manipulación del equipo se procedió con su encendido y configuración necesaria para el buen uso, estas indicaciones se encuentran detalladas en el instructivo GTN-I-1120 del Laboratorio de Petrografía, el cual sirvió como guía en los pasos descritos a continuación.

Lo primero fue conectar los dos adaptadores a la corriente, los cuales pertenecían a la unidad de control (**Figura 37.4**), el sistema de activación del cañón de electrones (**Figura 37.3**) y el equipo de luminiscencia OSA2. El microscopio y el computador también fueron conectados y encendidos.

Se activó el interruptor “Power” que correspondía a la unidad de control y se continuó a cambiar los ajustes correspondientes al amperaje y el voltaje del equipo girando las perillas hacia la derecha hasta obtener en la pantalla un valor de 200 μA y 15 kV respectivamente. A continuación, se oprimió el switch “Stop/Start” para accionar la bomba de vacío (**Figura 37.5**) y permitir que éste se generara en la platina donde estaba contenida la muestra, siendo dicho paso reflejado en la pantalla de la unidad mediante el mensaje “Pumping”.

En seguida se activó el switch “Auto-Man” para cambiar del modo manual al automático. Cuando el vacío estuvo por debajo de 0,5 mBar y la válvula llegó a un valor de 134 (**Figura 39**) se oprimió el switch Kv permitiendo que la unidad alcanzara el amperaje y voltaje indicado anteriormente.

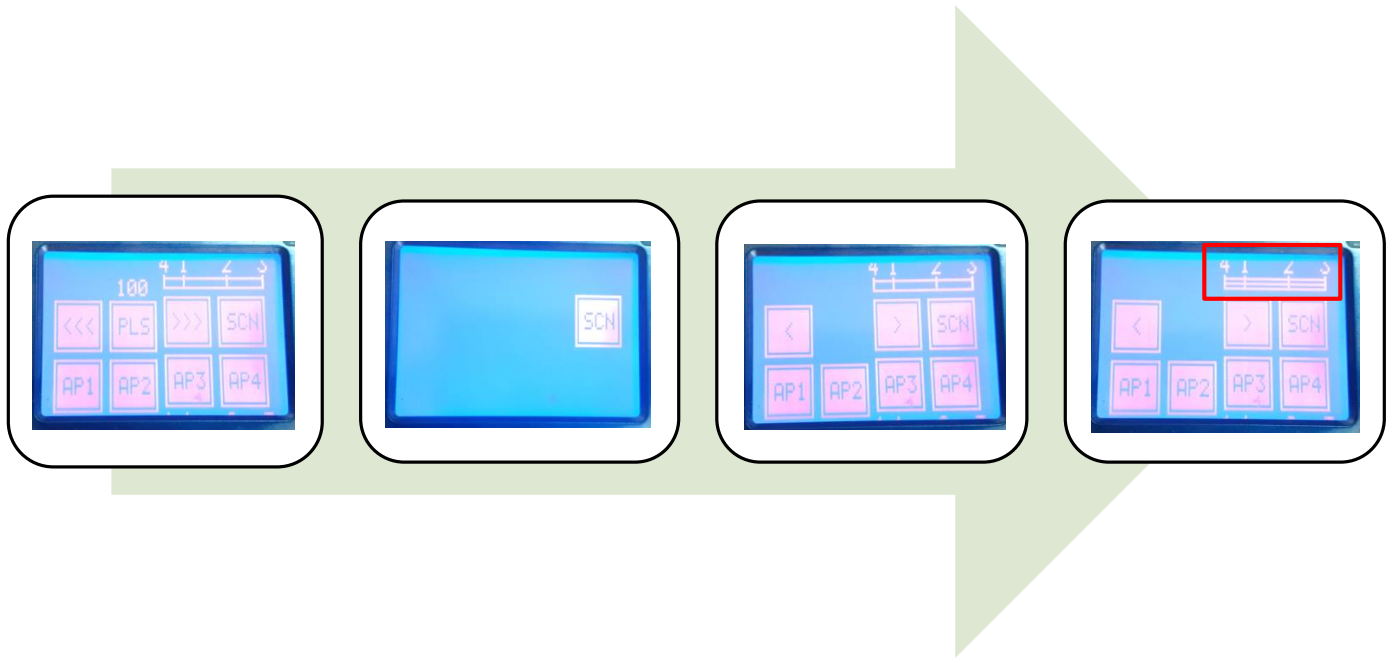
Para un seguimiento de los valores especificados a la unidad de control, se oprimió el switch “Sys Status”, el cual permitió ver en la parte inferior derecha el ascenso del valor dado inicialmente.

Figura 39. Condiciones requeridas de vacío y de la válvula para poder accionar el switch kV.



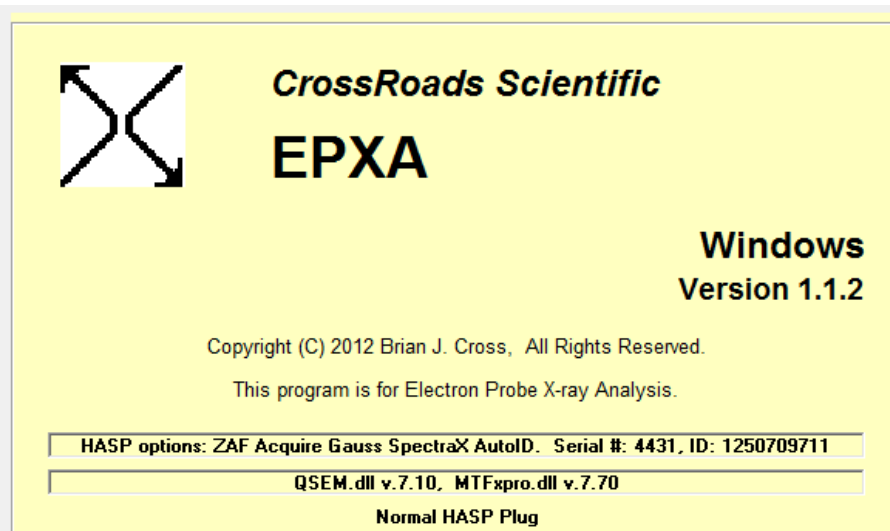
Posteriormente, se accionó el sistema de activación del cañón de electrones oprimiendo dos veces el indicativo SCN de la pantalla táctil y en seguida se eligió la apertura AP3, la cual correspondía a la apertura más pequeña del rayo de electrones (50 μm). Se esperó unos segundos hasta verificar que la barra superior visualizada en la pantalla se encontrara cargada con tres líneas, lo cual indicó que se estaba generando la emisión de electrones (**Figura 40**).

Figura 40. Pasos para la activación del cañón de electrones.



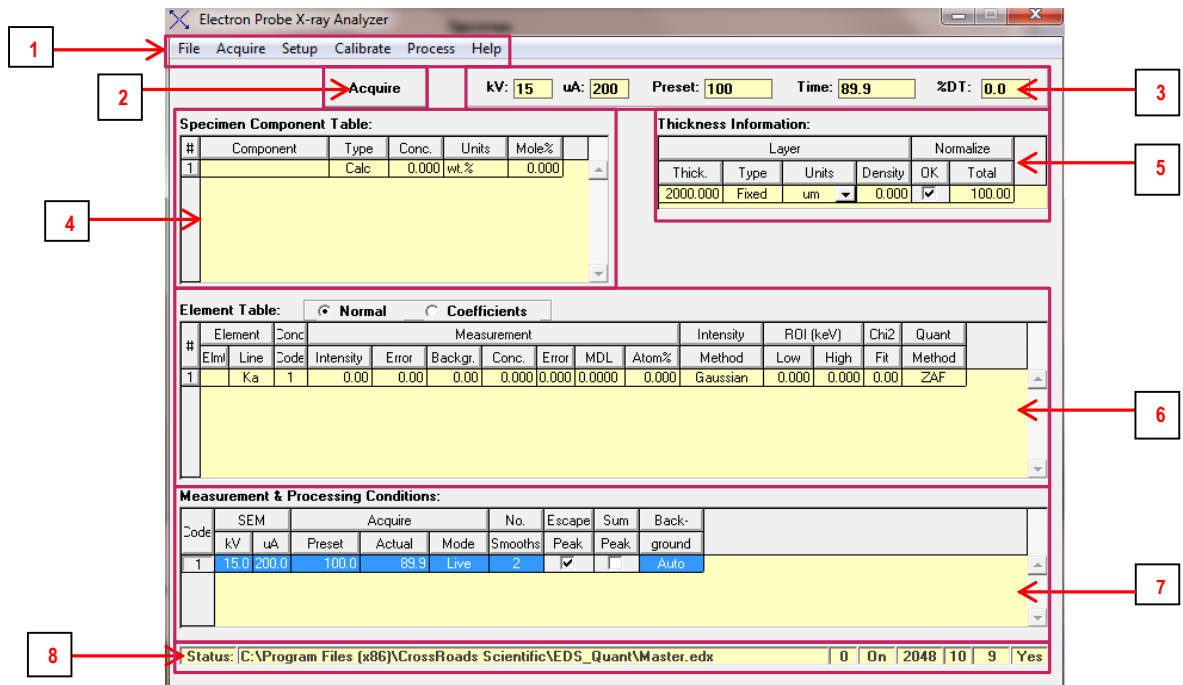
Para iniciar la lectura de los elementos contenidos en la muestra y generar su cuantificación se utilizó el software EPXA versión 1.1.2 (**Figura 41**). Al abrir el programa se seleccionó la opción “Yes” y posterior a esta elección emergió una nueva ventana a la cual se le dio “Ok”.

Figura 41. Software EPXA (CrossRoads Scientific).



En seguida apareció una ventana llamada “Electron Probe X-ray Analyzer”, en la cual se tuvo en cuenta la siguiente configuración correspondiente a la sección de Parámetros de medición (**Figura 42.3**) y la información del espesor de la muestra (**Figura 42.5**):

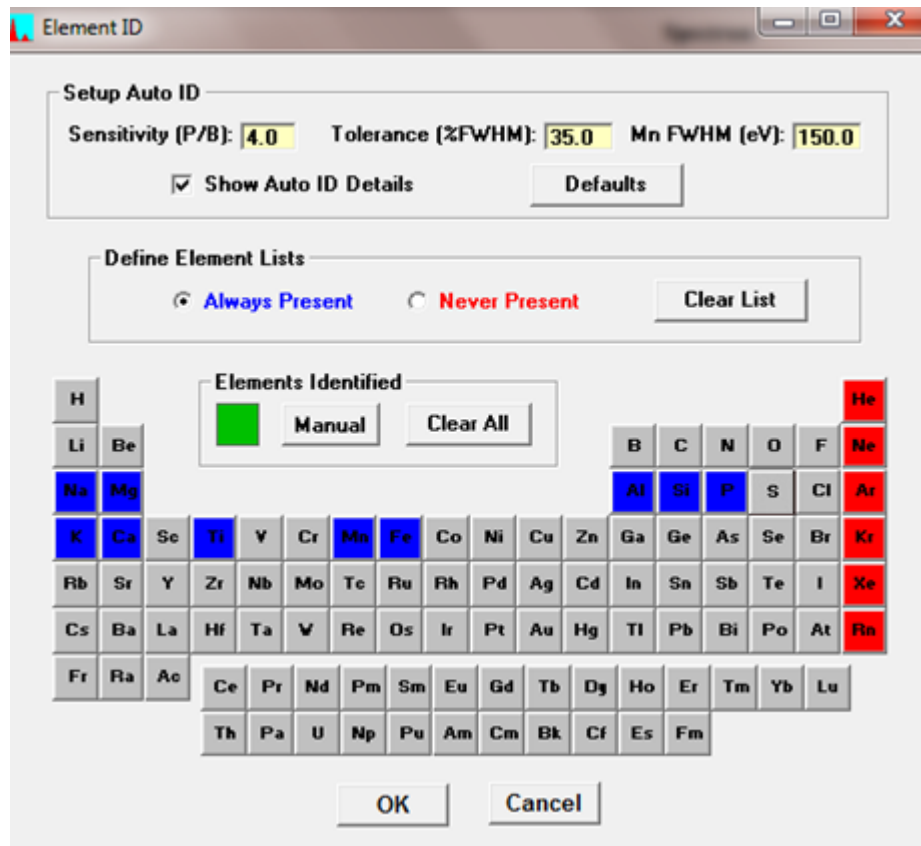
Figura 42. 1. Menú de opciones. 2. Icono de adquisición del espectro. 3. Parámetros de medición. 4. Tabla de componente espécimen. 5. Información del espesor de la muestra. 6. Tabla de elementos adquiridos. 7. Condiciones de medida y procesamiento. 8. Ubicación del archivo de calibración.



Luego, en el icono “Set up” ubicado en el menú superior de la ventana “Electron Probe X-ray Analyzer”, se seleccionó la opción “Auto ID” donde se eligieron los elementos a leer. En el caso de la pastilla tratada para lectura de elementos mayores, se marcaron en dicha sección los 10 elementos (**Figura 43**) que

corresponden a los mayores (Si, Al, K, Mg, Ca, Mn, Na, P, Ti, Fe), llamados así porque su abundancia en la corteza es mayor al 1%.

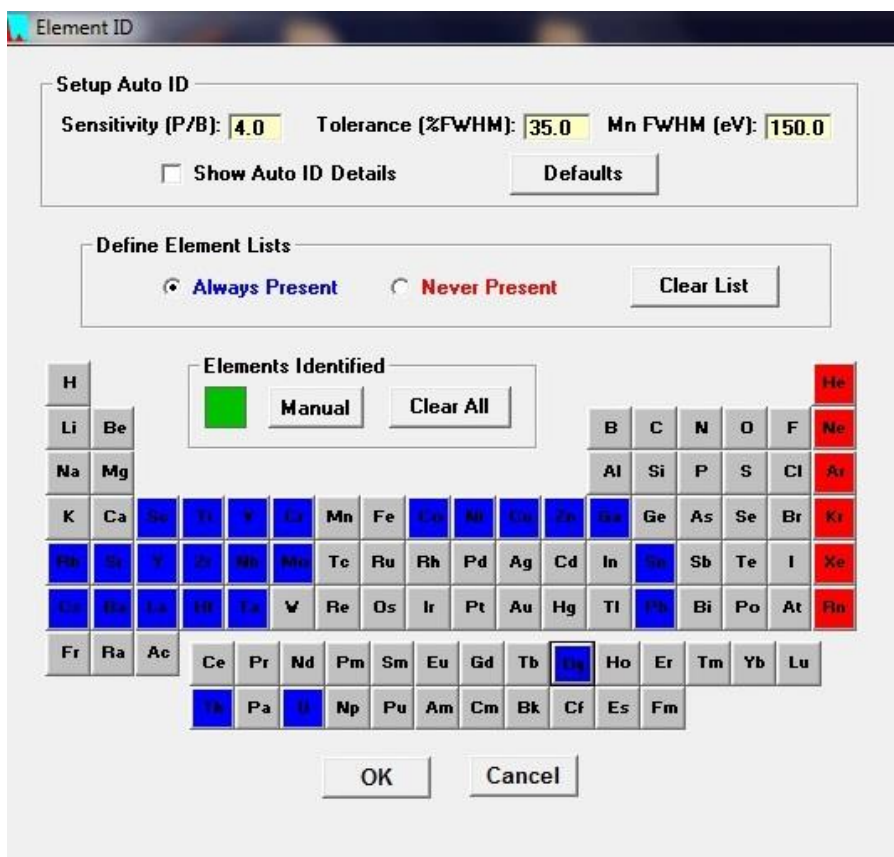
Figura 43. Selección de los elementos mayores en la pestaña “Element ID”.



En el caso de la pastilla preparada para generar la lectura de los elementos menores y trazas, se eligieron los siguientes elementos teniendo en cuenta su aplicabilidad en la geología según literatura (**ver sección 5.1.) (Figura 44)**: Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, La, Hf, Ta, Pb, Dy, Th, U, Dy; sin embargo, no todos los elementos seleccionados de este grupo fueron leídos por el equipo, ya que dependió de la concentración y la ocurrencia en la

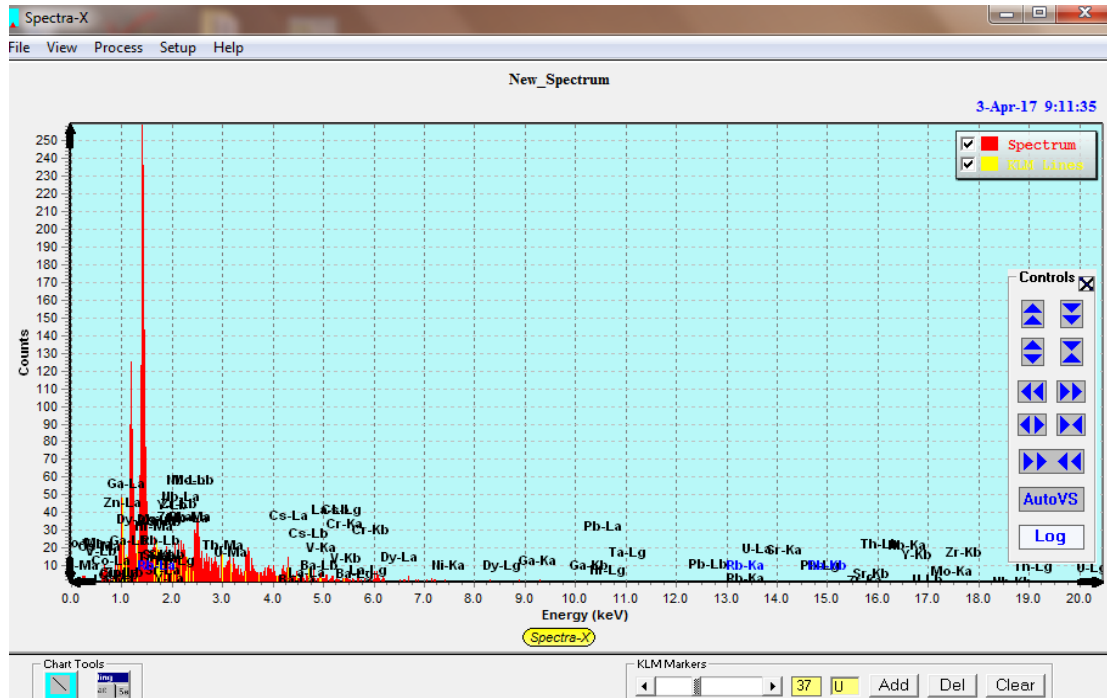
muestra, haciendo que el sistema arrojara de manera automática otros elementos detectados.

Figura 44. Selección de los elementos mayores en la pestaña “Element ID”.



Ya seleccionados los elementos se dió click en el icono “Acquire”, lo que permitió que se comenzara a formar el espectro en la ventana “Spectra X” durante un tiempo de 100 segundos (**Figura 45**).

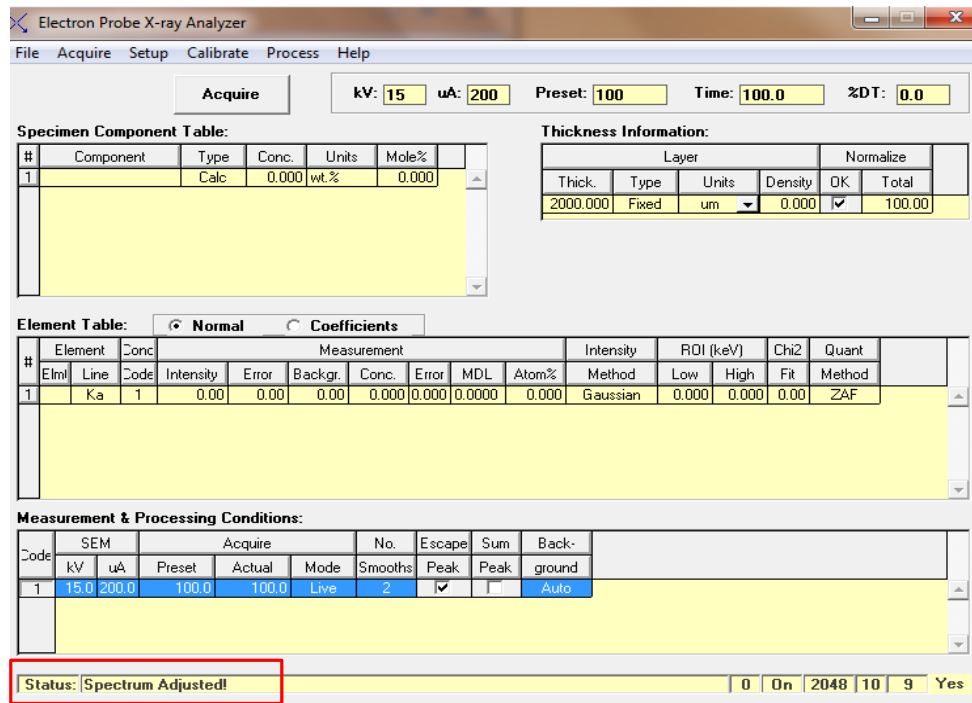
Figura 45. Generación del espectro.



Luego se eligió la pestaña “Calibrate” ubicada en el menú superior. Al desplegar la lista se seleccionó la opción “Spectrum” – “Adjust Spectrum” – Ok (**Figura 46**), lo que permitió que se realizara el ajuste del espectro haciendo que las posiciones de los picos coincidieran con las energías características de cada elemento de la tabla periódica (**Figura 47**).

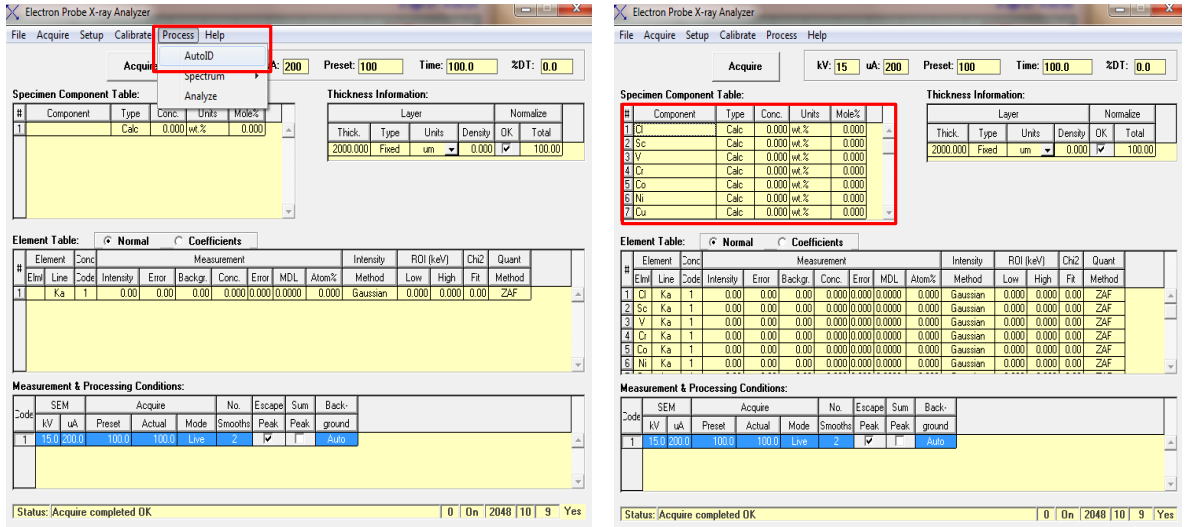
En la ventana “Electron Probe X-ray Analyzer” se vio reflejado el mensaje “Spectrum Adjusted!”, indicando que el espectro fue corregido (**Figura 48**).

Figura 48. Mensaje indicador de espectro ajustado.



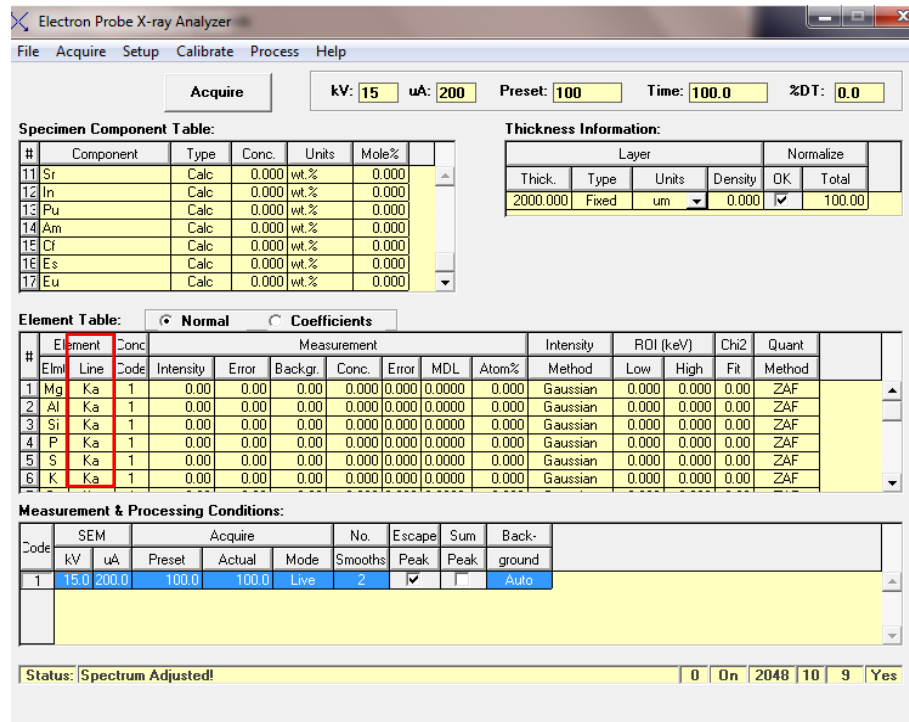
En seguida se seleccionó la pestaña “Process” ubicada en el menú superior y luego “Auto ID” con el fin de que el equipo reconociera los elementos elegidos (**Figura 49**).

Figura 49. Detección de elementos según elección e identificación automática.



Para el caso de los elementos mayores, en la sección “Element Table”, aparecieron los elementos detectados con su respectivo nivel de energía identificado, donde dichos elementos fueron reconocidos en el nivel de energía *K* (Figura 50).

Figura 50. Columna “Line” para cambios de los niveles de energía del elemento.



En contraste, para los elementos menores fue necesario dejar tal cual el nivel de energía que detectó el equipo, ya fuese el nivel K, L o M.

A continuación, se escogió la opción “Process” situada en el menú superior, de allí se eligió “Spectrum” y luego “All” (Figura 51). Este paso tuvo como fin eliminar el ruido o radiación de fondo del espectro (Figura 52).

Figura 51. Paso de eliminación del ruido en el espectro.

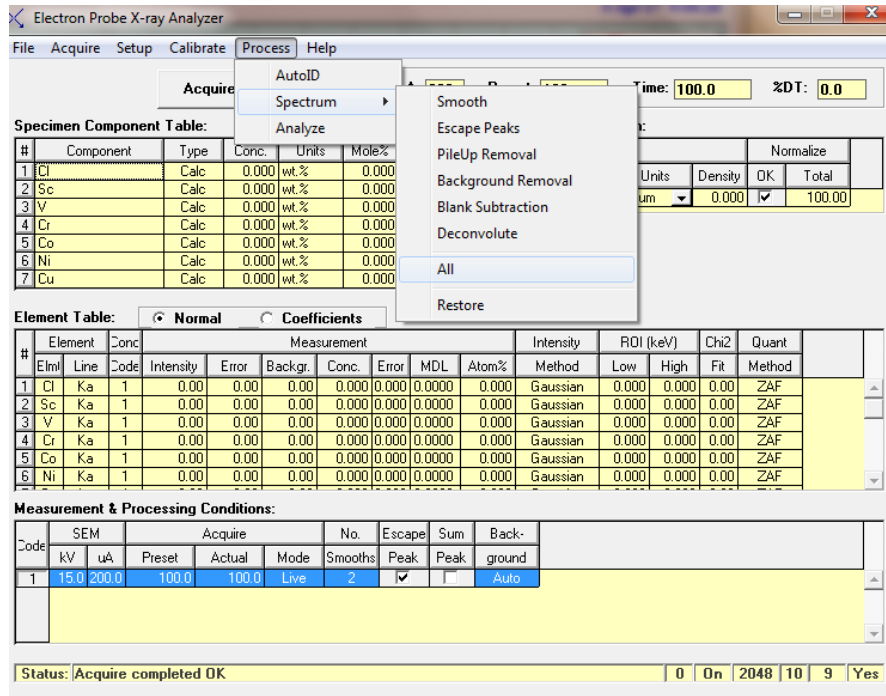
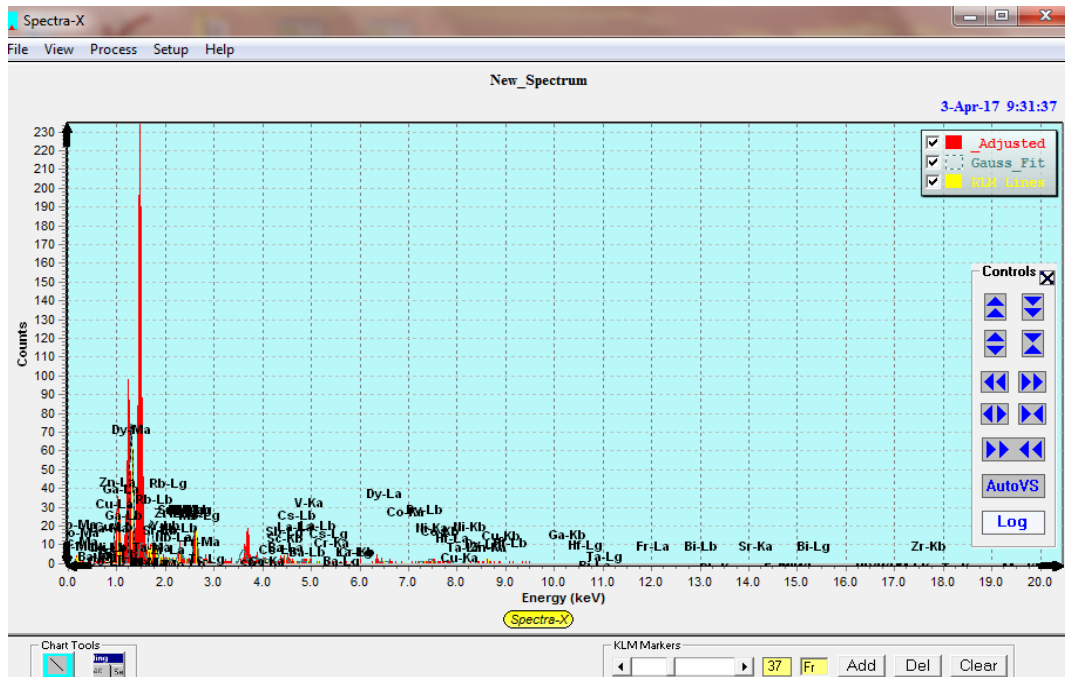
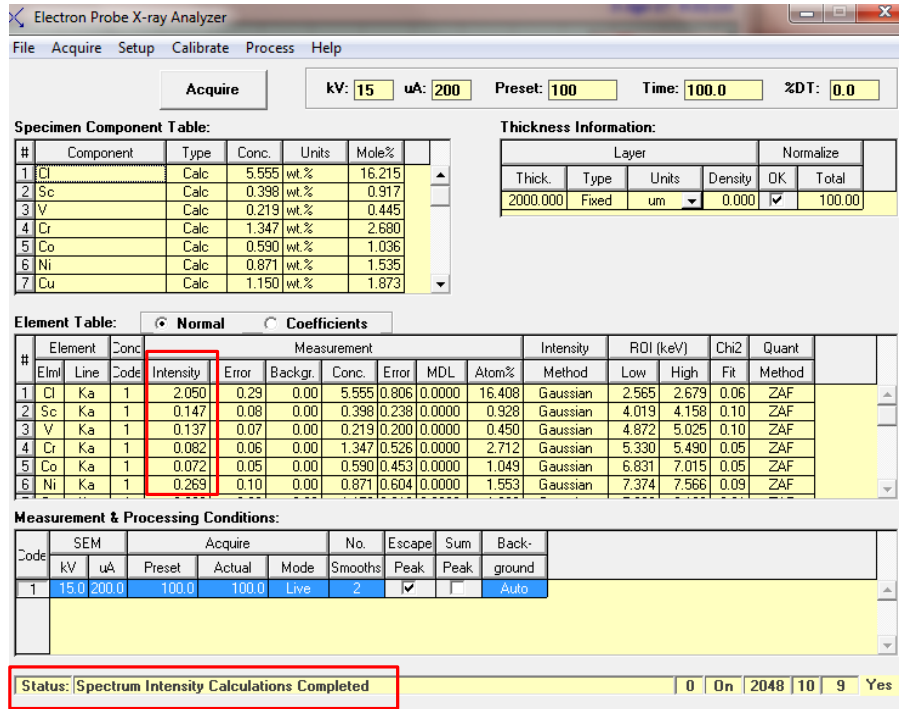


Figura 52. Espectro adecuado para cuantificación de componentes.



Después de ser hecho este paso, se pudo observar que la cuantificación de las intensidades características de cada elemento fue realizada con éxito (**Figura 53**).

Figura 53. Mensaje indicando que el cálculo de las intensidades en el espectro se ha realizado.



Por último, se seleccionó nuevamente a la opción “Process” – “Analyze” para que el software calculara las concentraciones de los elementos contenidos en la muestra. El mensaje “Completed E-Beam EDS Quantitative Analysis” (**Figura 54**) afirmó que se obtuvo el espectro final (**Figura 55**).

Figura 54. Cuantificación de las concentraciones de cada elemento identificado en la muestra.

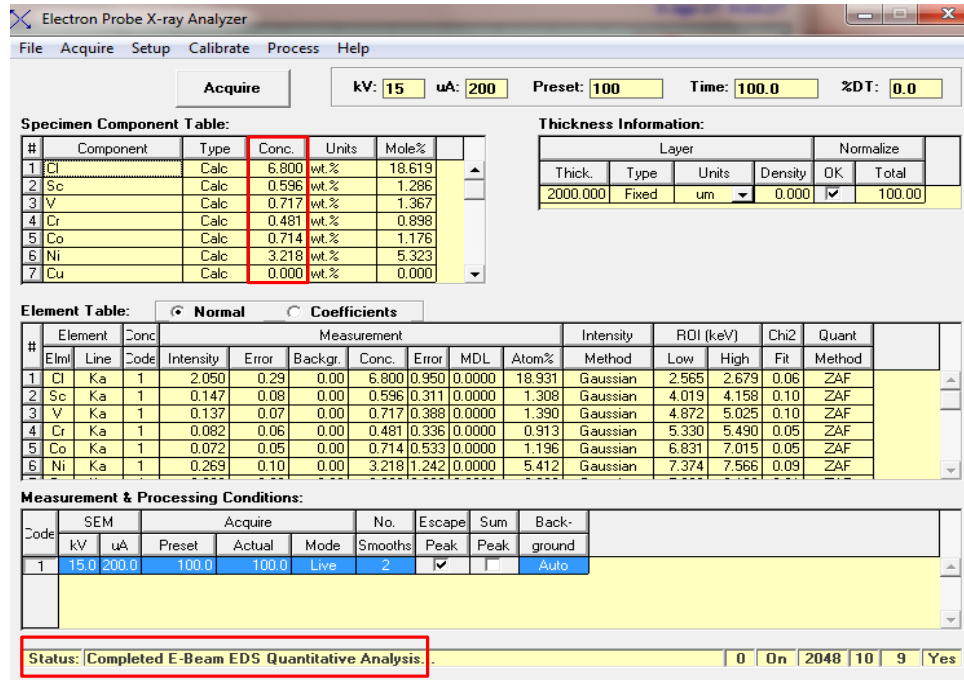
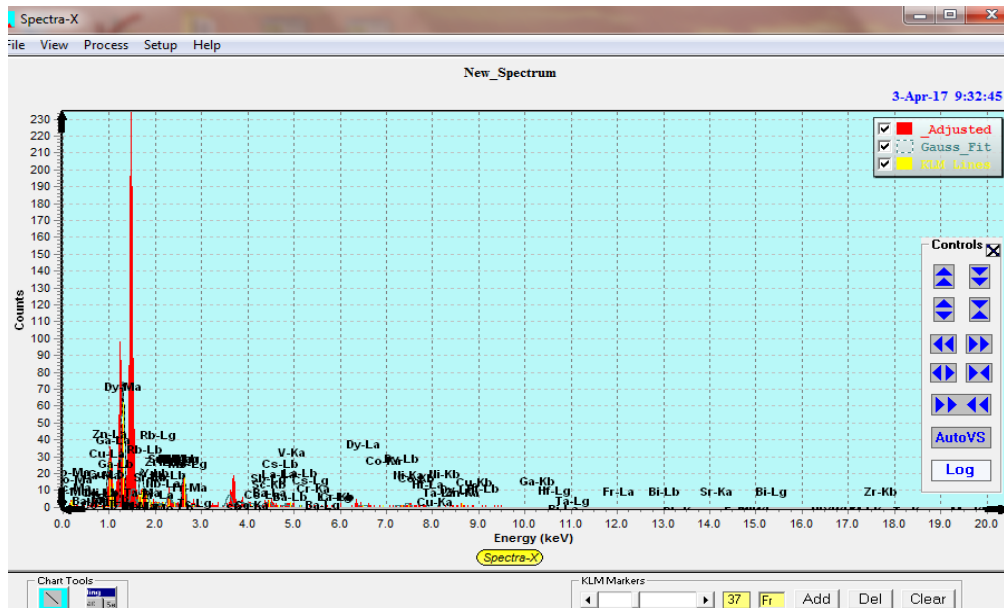


Figura 55. Espectro final obtenido de una muestra de lodolita.



El equipo permitió exportar en formato txt. **(Figura 56)** los datos de cada espectro generado, los cuales fueron organizados en Excel para realizar los cálculos necesarios y tener una mejor visualización de los mismos. Cada una de las pastillas fue corrida en el equipo cuatro veces con el fin de obtener un promedio de los datos reportados para cada elemento presente en la muestra.

Figura 56. Datos en formato txt. Arrojados por el equipo.

2556-2565-C1: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

CrossRoads Scientific Quantitative EDS Analysis

File: C:\Program Files (x86)\CrossRoads Scientific\EDS_Quant\Master.edx
11:52:25 10-Mar-17

Comment line

Layer Table =====
Thick Type Error Units Density Norm. Total
1 2000.00 Fixed 0.00 um 0.00 On 100.00

Sample Table =====
Component Type Conc. Error Units Mole%
Mg Calc 4.099 0.000 wt.% 4.900
Al Calc 23.103 0.000 wt.% 24.881
Si Calc 57.032 0.000 wt.% 59.007
P Calc 1.225 0.000 wt.% 1.149
S Calc 0.128 0.000 wt.% 0.116
Cl Calc 1.065 0.000 wt.% 0.873
K Calc 3.064 0.000 wt.% 2.277
Ca Calc 1.329 0.000 wt.% 0.964
Ti Calc 0.362 0.000 wt.% 0.220
Mn Calc 0.444 0.000 wt.% 0.235
Fe Calc 6.618 0.000 wt.% 3.444

Los resultados obtenidos contienen los datos de 62 muestras en las que fueron leídos 35 elementos químicos entre mayores, menores y traza, obteniendo un total de 8.680 datos. Sin embargo, por cuestiones de confidencialidad, los archivos originales de los datos no pueden ser anexados en este trabajo **(ver anexo B)**.

7.4 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL EQUIPO

Al ser un estudio piloto, fue importante comprobar si el equipo permitía la buena lectura tanto de los elementos mayores como de los menores y traza. Para esto fue necesario corroborar dicha detección mediante la comparación de resultados entre el equipo EDS y la técnica ICP-OES/MS, siendo esta última validada y usada internacionalmente en este tipo de análisis. Para ello se utilizó el material de referencia BIR-1, el cual fue analizado bajo la técnica ICP-OES y los resultados se encuentran a disposición por el Servicio Geológico de los Estado Unidos (USGS). De este mismo patrón fue elaborada la respectiva pastilla para ser medida bajo la técnica EDS y poder contrastar las concentraciones obtenidas en ambos métodos.

Esta verificación se hizo en un inicio solo con los elementos mayores. Los resultados arrojaron que existía un grado considerable de precisión por parte del equipo EDS para la lectura de dichos elementos (**Figura 57**), deduciendo hipotéticamente que así mismo el equipo estaría calibrado para lectura de elementos menores y traza. Sin embargo, al entrar en la fase de resultados y hacer la respectiva verificación para elementos menores y traza, se detectaron altas diferencias en ordenes de magnitud en dichos elementos por lo que se tomó la decisión de descartarlos de este estudio, ya que se estarían asumiendo inferencias a partir de datos no confiables, pues ni siquiera se mantiene las tendencias (**Figura 59,60**).

El reporte de los elementos mayores por la mayoría de las técnicas de espectroscopia atómica, parten de la disolución de los silicatos (óxidos) a partir de los vapores de HF principalmente, donde la muestra es dissociada y los átomos ionizados, por esto los porcentajes de sus elementos pueden ser reportados como óxidos; mientras que el reporte de los elementos mayores por la técnica de EDS desarrollada en este trabajo, parte de la muestra bulk, es decir, sin tratamiento

previo correspondiendo al 100%. Teniendo en cuenta la salvedad dada, los análisis posteriores donde se compararán los resultados bajo las técnicas ICP-OES y EDS, serán correlacionables exceptuando los óxidos de hierro, los cuales por la técnica EDS corresponderían al hierro total.

Figura 57. A. Datos del material de referencia BIR-1, avalados por el USGS mediante la técnica ICP-OES. B. Datos del material de referencia BIR-1 tomados en el equipo EDS.

Comparación Elementos Mayores

 **United States Geological Survey**
Certificate of Analysis
Icelandic Basalt, BIR-1

Recommended values					
Oxide	Wt %	±	Oxide	Wt %	±
SiO ₂	47.96	0.19	Na ₂ O	1.82	0.045
Al ₂ O ₃	15.5	0.15	K ₂ O	0.030	0.003
CaO	13.3	0.12	MnO	0.175	0.003
MgO	9.70	0.079	P ₂ O ₅	0.021	0.001
FeO	8.34	0.10	TiO ₂	0.96	0.01
Fe ₂ O ₃	2.06	0.10	Fe ₂ O ₃ T	11.3	0.12

EDS		
Elemento	Wt%	±
Al	20.41	±0,68
Ca	15.35	±1,40
Fe	7.11	±1,53
K	0.58	±0,16
Mg	5.26	±0,36
Mn	0.54	±0,22
Na	1.95	±0,18
P	1.07	±0,53
Si	46.70	±0,73
Ti	1.03	±0,46

Figura 58. A. Gráfico de dispersión de los datos mayores reportados por la ICP-OES y la EDS. B. Gráfico de correlación entre los datos de la técnica ICP-OES y la EDS

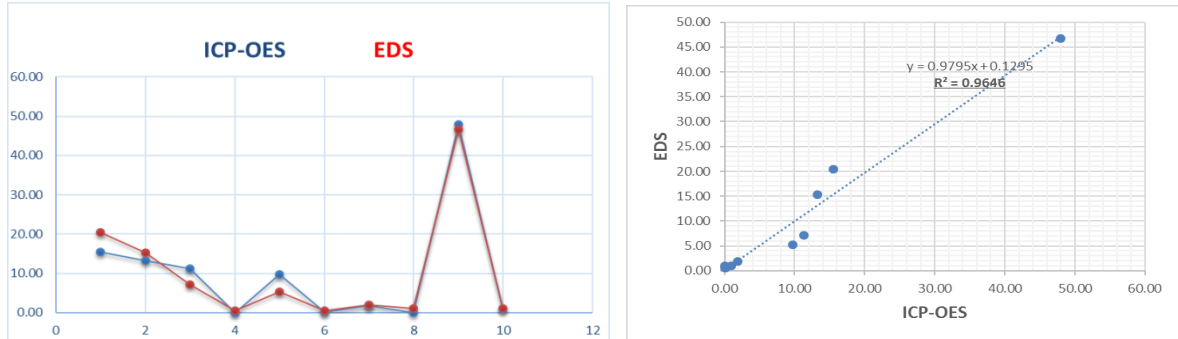


Figura 59. A. Datos del material de referencia BIR-1, avalados por el USGS mediante la técnica ICP-MS. B. Datos del material de referencia BIR-1 tomados en el equipo EDS.

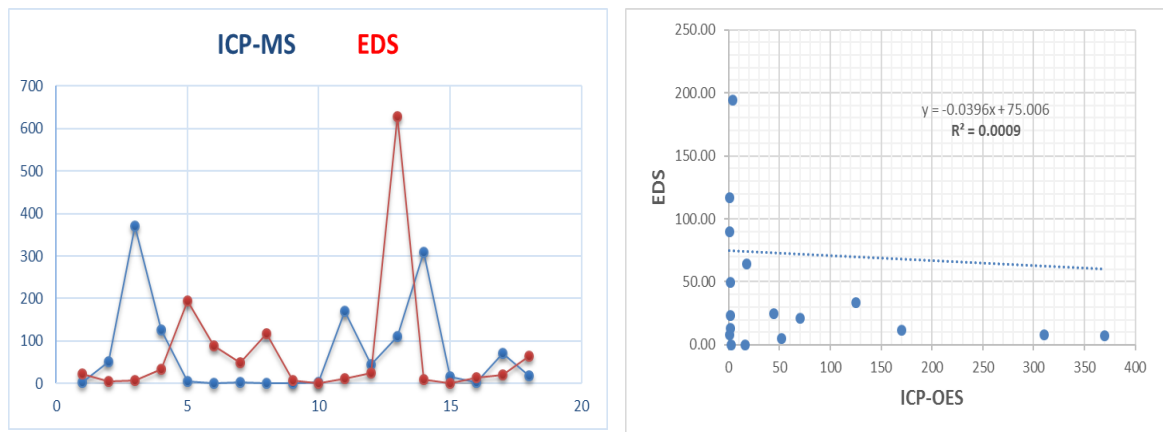
Comparación Elementos Menores

USGS United States Geological Survey
 Certificate of Analysis
 Icelandic Basalt, BIR-1

Element	µg/g	±	Element	µg/g	±	Element	µg/g	±
Cu	125	4	Hf	0.6	0.08	Sr	110	2
Dy	4	1	Nd	2.5	0.7	V	310	11
Ce	1.9	0.4	Ni	170	6	Y	16	1
Co	52	2	La	0.63	0.07	Yb	1.7	0.1
Cr	370	8	Li	3.6	0.2	Zn	70	9
Eu	0.55	0.05	Sc	44	1	Zr	18	1
Gd	1.8	0.4						

EDS		
Elemento	ug/g	±
Ce	23.64	±2.10
Co	4.73	±1.16
Cr	7.21	±0.69
Cu	33.83	±2.43
Dy	194.04	±5.12
Eu	89.66	±1.96
Gd	49.57	±4.15
Hf	116.90	±3.88
La	7.93	±1.60
Nd	0.00	±0
Ni	11.37	±1.01
Sc	24.79	±1.16
Sr	628.36	±5.09
V	8.22	±0.50
Y	0.00	±0
Yb	12.86	±3.15
Zn	21.30	±0.97
Zr	64.28	±1.63

Figura 60. A. Gráfico de dispersión de los datos mayores reportados por la ICP-OES y la EDS. B. Gráfico de correlación entre los datos de la técnica ICP-OES y la EDS.



En la comparación de los elementos mayores fue evidente la existencia de una correlación directa entre los datos obtenidos bajo la técnica EDS y los datos del USGS bajo la técnica ICP-OES, presentando un $R^2 = 0,96$ y una pendiente de 1 (**Figura 58.B**). En contraste, al comparar los resultados obtenidos de los elementos menores, traza y REE mediante la técnica EDS, se determinó que no existe correlación alguna con los datos arrojados por la ICP-MS para dichos elementos, presentando un $R^2 = 0.0009$ y una pendiente de 0.0396 (**Figura 60.B**).

7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Partiendo de la observación mencionada anteriormente, se procedió a trabajar solo con los elementos mayores. La **tabla 2** comprende los valores de las concentraciones (wt%) de todos los elementos mayores en las profundidades analizadas. La **tabla 3**, resume para la profundidad 2439 m, la manera apropiada de organización de los datos y su respectivo rango de probabilidad de acierto,

conocido como intervalo de confianza (IC), que en este caso es del 95% (ver anexo C).

Tabla 2. Datos de elementos mayores (wt%) tomados a partir de la técnica EDS.

DEPTH	Si	Al	Ca	Mg	Fe	Na	K	Mn	P	Ti
2259	62.441	22.328	1.323	2.524	4.458	1.151	3.116	0.328	1.445	0.884
2319	61.525	24.351	0.841	2.525	4.350	1.544	2.565	0.283	0.963	1.054
2379	56.939	22.353	4.066	3.790	5.912	1.593	2.516	0.176	1.360	1.296
2439	58.067	19.070	1.909	1.855	11.480	0.752	4.155	0.164	1.134	1.413
2493	59.446	23.124	1.781	3.485	5.799	1.190	2.873	0.355	0.971	0.976
2556	57.646	24.047	1.642	3.995	5.899	1.365	2.707	0.429	1.283	0.987
2619	58.380	23.443	1.013	3.838	6.147	1.512	3.145	0.577	1.106	0.839
2673	57.373	23.593	1.311	3.705	6.516	1.270	3.363	0.405	1.109	1.356
2739	58.416	23.806	0.811	3.955	5.637	1.308	3.343	0.527	1.170	1.026
2799	59.295	23.960	1.021	4.164	5.467	1.281	2.878	0.386	0.771	0.776
2859	58.663	23.759	0.851	4.032	6.066	1.349	3.198	0.522	0.566	0.994
2898	59.189	23.394	1.776	4.046	5.165	1.630	1.871	0.596	1.238	1.096
2961	57.221	26.196	1.951	3.089	5.841	0.534	2.802	0.570	0.951	0.844
3033	59.854	22.941	1.577	4.254	4.848	1.668	2.497	0.485	0.714	1.162
3105	61.708	17.309	3.345	4.150	4.878	4.297	1.561	0.647	1.056	1.048
3177	60.583	23.556	1.212	3.692	5.619	1.294	2.300	0.266	0.202	1.276
3249	60.368	23.513	0.886	4.078	4.381	1.524	2.890	0.258	0.917	1.185
3310	64.739	13.945	3.864	4.619	4.403	4.222	1.481	0.638	0.975	1.114
3393	60.739	22.746	1.038	4.282	4.638	1.493	2.145	0.557	1.366	0.997
3465	59.321	23.464	0.747	4.052	5.724	1.497	2.729	0.360	1.335	0.772
3537	57.477	21.969	1.810	4.148	5.415	2.215	3.034	1.094	1.406	1.433
3609	53.456	26.647	1.656	4.812	6.106	1.589	3.442	0.441	0.419	1.432
3681	56.465	26.284	1.997	3.499	5.982	0.678	2.358	0.245	1.296	1.195
3711	56.495	24.584	1.174	3.533	6.082	2.384	2.485	0.374	1.700	1.190
3735	57.578	22.195	2.049	4.635	6.894	1.707	2.407	0.389	1.122	1.024
3759	55.250	24.917	1.828	4.721	6.091	1.838	2.939	0.637	0.454	1.322
3783	59.637	22.702	1.355	3.969	5.640	1.593	2.284	0.337	1.179	1.302
3807	59.117	23.267	2.331	2.207	6.124	1.290	2.801	0.241	0.903	1.718
3831	53.606	25.927	3.090	4.715	6.543	1.775	2.244	0.592	0.418	1.090
3855	57.939	22.989	2.017	3.549	5.769	1.488	3.682	0.517	1.026	1.023
3882	54.541	24.990	2.846	4.759	5.967	1.776	2.787	0.781	0.386	1.168
3906	58.807	24.126	1.968	4.416	4.335	1.564	2.275	0.261	1.327	0.922
3930	57.283	23.019	3.134	4.090	6.246	1.610	2.578	0.234	0.465	1.341
3954	51.058	22.630	2.088	4.882	6.383	2.271	3.114	2.997	2.253	2.324
3978	58.075	24.786	2.142	4.577	4.239	1.451	2.909	0.375	0.498	0.949
4002	57.995	23.647	1.652	3.977	5.964	1.528	2.692	0.475	0.903	1.167
4026	57.751	23.468	2.046	4.433	6.322	1.366	2.698	0.211	0.575	1.131
4050	57.347	22.506	1.257	3.519	6.327	1.779	4.042	0.785	1.163	1.275
4098	56.766	21.884	2.799	3.669	7.344	1.649	2.718	0.252	1.606	1.314
4122	62.745	20.219	2.730	4.681	2.843	2.612	1.902	0.091	1.440	0.737
4146	58.941	21.305	2.755	4.186	5.879	1.831	2.283	0.085	1.650	1.084
4170	59.284	24.936	1.797	2.939	4.372	1.611	2.087	0.318	1.698	0.958
4215	57.601	24.012	2.240	4.571	5.628	1.699	2.641	0.409	0.699	0.501
4236	57.481	22.097	3.323	3.382	6.127	1.140	3.413	0.556	1.480	0.998
4254	58.619	23.745	1.365	4.867	4.947	1.614	2.007	0.952	0.643	1.241
4305	55.926	22.464	3.161	4.418	6.443	1.878	3.093	0.363	1.177	1.077
4362	57.195	23.494	2.566	4.788	5.955	1.128	2.995	0.288	0.353	1.238
4416	54.833	23.323	4.142	4.639	5.271	1.509	3.422	0.328	1.321	1.211
4482	56.616	22.882	4.111	5.127	5.034	1.785	2.962	0.238	0.549	0.695
4536	56.362	22.424	4.191	3.948	5.114	1.601	3.803	0.731	0.609	1.217
4590	58.672	24.159	3.787	4.755	3.683	1.862	0.929	0.431	1.022	0.701
4662	58.694	22.890	3.336	4.684	4.518	1.291	2.472	0.475	0.408	1.232
4716	56.568	22.079	4.390	4.329	6.032	1.769	1.937	0.428	1.025	1.443
4779	56.487	21.737	7.589	2.537	5.594	1.463	1.797	0.318	1.302	1.175
4839	58.961	23.314	3.046	4.925	4.451	1.519	1.930	0.455	0.483	0.916
4929	60.215	22.084	4.351	4.272	4.366	1.513	1.196	0.355	0.628	1.021
4962	60.789	20.920	5.722	3.884	3.876	1.687	1.075	0.631	0.457	0.959
5019	58.782	18.629	7.897	4.217	3.262	2.241	2.639	0.244	1.141	0.948
5199	58.295	22.612	3.384	3.669	4.522	1.486	3.316	0.165	1.149	1.403
5439	57.457	21.686	3.106	2.993	6.641	1.513	3.197	0.829	1.109	1.469
5619	58.066	23.641	4.023	4.452	3.552	1.727	1.604	0.642	1.394	0.899
5859	57.111	21.995	4.040	4.141	4.562	1.852	3.646	0.300	1.409	0.944

Tabla 3. Datos de elementos mayores para la profundidad 2439 m a partir de EDS.

2439-2448 m		
Elemento	wt%	IC (95%)
Si	58.067	±0,16
Al	19.070	±0,11
Ca	1.909	±0,13
Mg	1.855	±0,18
Fe	11.480	±0,25
Na	0.752	±0,06
K	4.155	±0,53
Mn	0.164	±0,03
P	1.134	±0,15
Ti	1.413	±0,10

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software libre *R programming for statistical computing*, a través la interfaz *R STUDIO* (**Figura 61**).

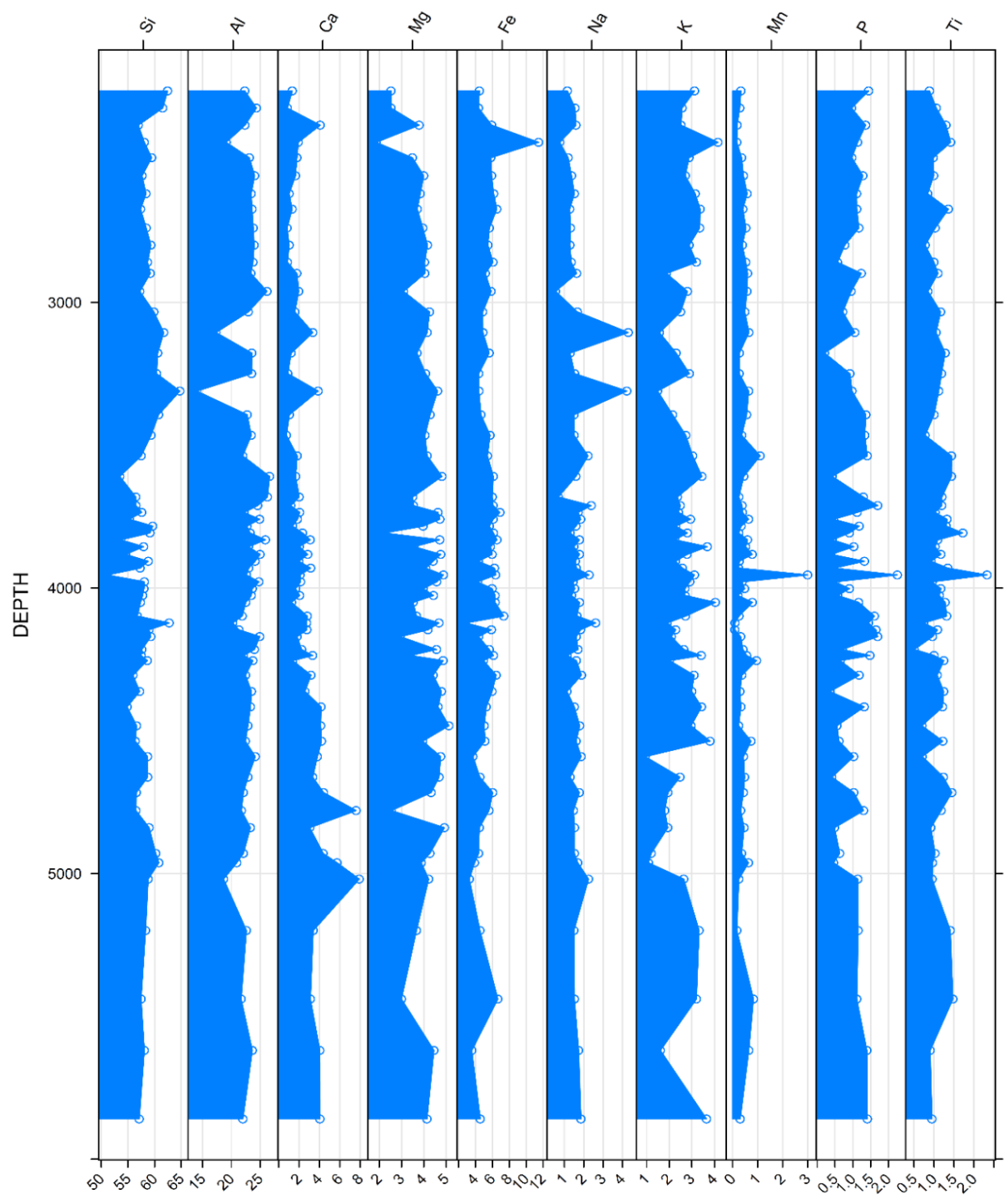
Se realizó un diagrama de distribución estratigráfica (curvas de tendencia) de las concentraciones de los elementos químicos mayores (**Figura 62**), con el fin de visualizar cambios en la sucesión sedimentaria del Pozo-1.

Figura 61. Interfaz gráfica del software R (R STUDIO).

The screenshot displays the RStudio environment with the following components:

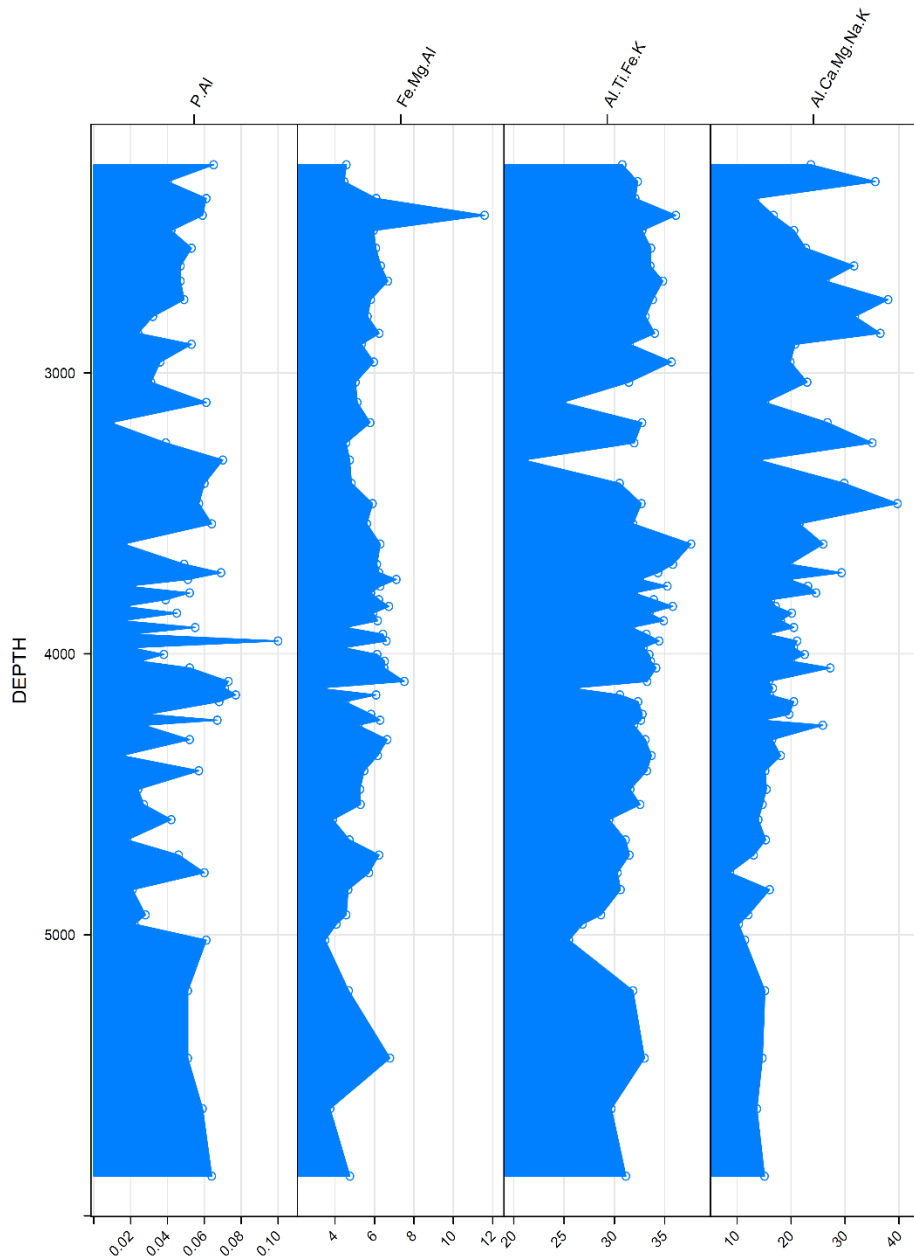
- Source Editor:** A data table with columns for elements (Si, Al, Ca, Mg, Fe, Na, K, Mn, P, Ti) and rows of numerical data. The first row is: 2259 02.441 22.328 1.323 2.524 4.458 1.151 3.116 0.328 1.445 0.884.
- Console:** Shows the output of a command, displaying a large matrix of numerical values. The first line is: 3954 0.5105800 0.2263000 0.020880000 0.04882000 0.06383000 0.022710000 0.031140000 0.02997000000.
- Environment:** Lists objects in the workspace, including 'Global Environment', 'C1ust', 'diss', 'g1me1ementos', 'g1me1ementoslog', 'PCA', 'PCATog1', 'p1t', and 'tmp'.
- Files:** Shows the file explorer with 'Install' and 'Update' buttons.
- Packages:** A list of installed and available packages, including 'analogue', 'analogueExtra', 'asserthat', 'bayesm', 'BH', 'biglm', 'bitops', 'boot', 'brglm', 'car', 'chron', 'class', and 'cluster'.

Figura 62. Curvas de tendencia de las concentraciones químicas de elementos mayores para el Pozo-1.



Así mismo se graficaron las curvas de tendencia de las relaciones químicas correspondientes a elementos mayores, planteadas en la **sección 5.1. (Figura 63):** P/Al, Fe+Mg/Al, Al+Ti+Fe+K, Al/Ca+Mg+Na+K (ver anexo D).

Figura 63. Curvas de tendencia de relaciones químicas del Pozo-1.



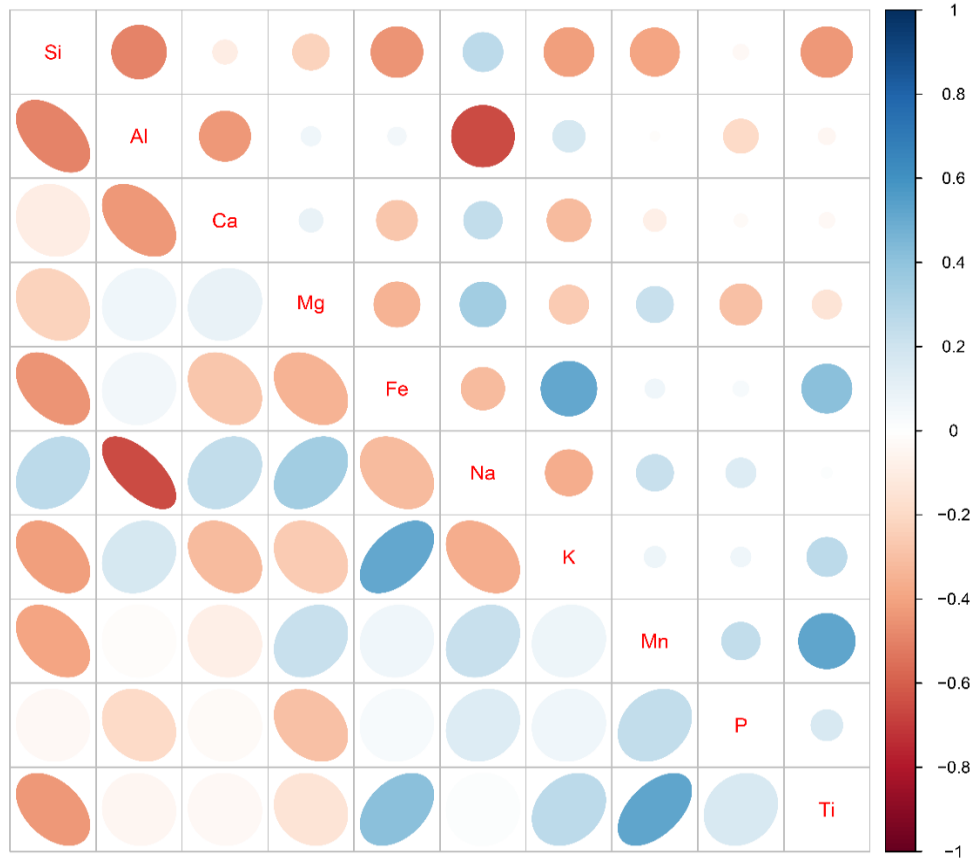
Las gráficas de distribución estratigráfica de las concentraciones químicas se realizaron mediante la función *Stratplot* del paquete *Analogue*, autor: Gavin L. Simpson).

Adicionalmente, se realizó una matriz de correlación con el fin de encontrar relaciones en las variaciones de los elementos químicos mayores (**Tabla 4 - Figura 64**) y corroborar dichos cambios proyectados en el diagrama de distribución. Para ello se utilizó la función *Corrplot.mixed* del paquete *Corrplot*, autor: Taiyun Wei.

Tabla 4. Matriz con los valores del coeficiente de correlación de Pearson.

	Si	Al	Ca	Mg	Fe	Na	K	Mn	P	Ti
Si	1.000	-0.494	-0.098	-0.221	-0.443	0.262	-0.410	-0.399	-0.039	-0.438
Al	-0.494	1.000	-0.431	0.062	0.054	-0.653	0.171	-0.013	-0.199	-0.046
Ca	-0.098	-0.431	1.000	0.092	-0.275	0.243	-0.314	-0.083	-0.028	-0.039
Mg	-0.221	0.062	0.092	1.000	-0.349	0.346	-0.256	0.225	-0.292	-0.141
Fe	-0.443	0.054	-0.275	-0.349	1.000	-0.311	0.513	0.062	0.039	0.412
Na	0.262	-0.653	0.243	0.346	-0.311	1.000	-0.366	0.227	0.148	0.017
K	-0.410	0.171	-0.314	-0.256	0.513	-0.366	1.000	0.074	0.064	0.262
Mn	-0.399	-0.013	-0.083	0.225	0.062	0.227	0.074	1.000	0.241	0.526
P	-0.039	-0.199	-0.028	-0.292	0.039	0.148	0.064	0.241	1.000	0.163
Ti	-0.438	-0.046	-0.039	-0.141	0.412	0.017	0.262	0.526	0.163	1.000

Figura 64. Matriz de correlación de los elementos mayores del Pozo-1.

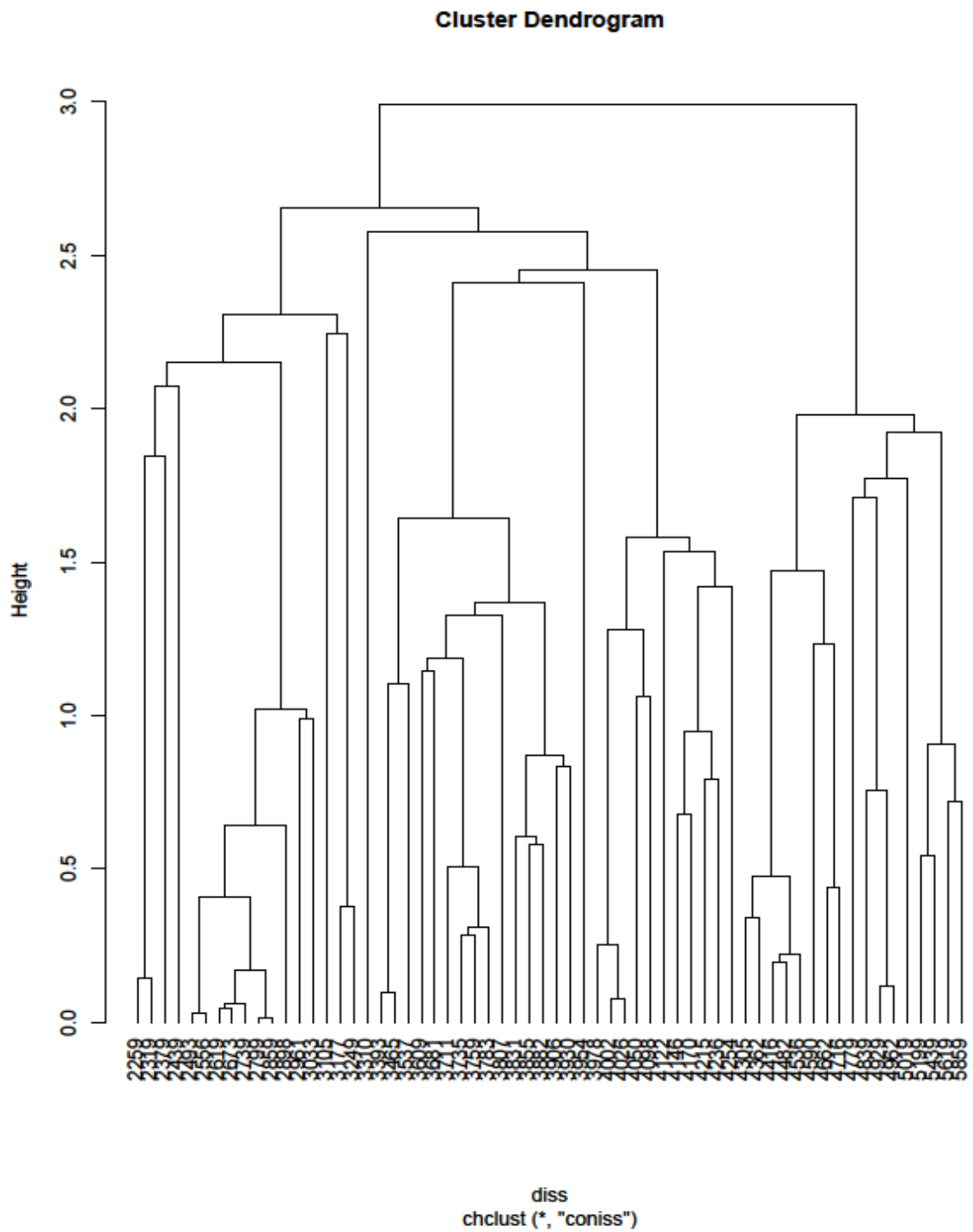


De acuerdo a el coeficiente de correlación de Pearson, se pudo ver gráficamente si existía una relación directa o inversa entre dichos elementos y que tan fuerte o débil era.

Estos valores son traducidos en la matriz de correlación por tonalidades azules (orientación a la derecha) y rojas (orientación a la izquierda), significando una relación directa e negativa respectivamente. Entre más fuerte sea la correlación de dos elementos, más elongada estará la elipse.

Para poder determinar las quimiofacies de los datos obtenidos, se realizó un análisis de cluster jerárquico aglomerativo con restricción estratigráfica, para agrupar las profundidades con características químicas similares (**Figura 65**). La restricción estratigráfica fue necesaria para mantener el gradiente de profundidad de las muestras y poder ver ordenadamente las quimiofacies en la columna del pozo. Para este caso se usó la función *Chclust* del paquete *Rioja*, autor: Steve Juggins.

Figura 65. Clúster de las muestras analizadas en el Pozo-1.



Los grupos resultantes del cluster fueron comparados con las curvas de tendencia de los elementos químicos y las relaciones químicas, para poder observar diferencias. De esta manera se reconocieron seis quimiofacies (**Figura 66,67**).

Figura 66. Quimiofacies identificadas en el Pozo-1.

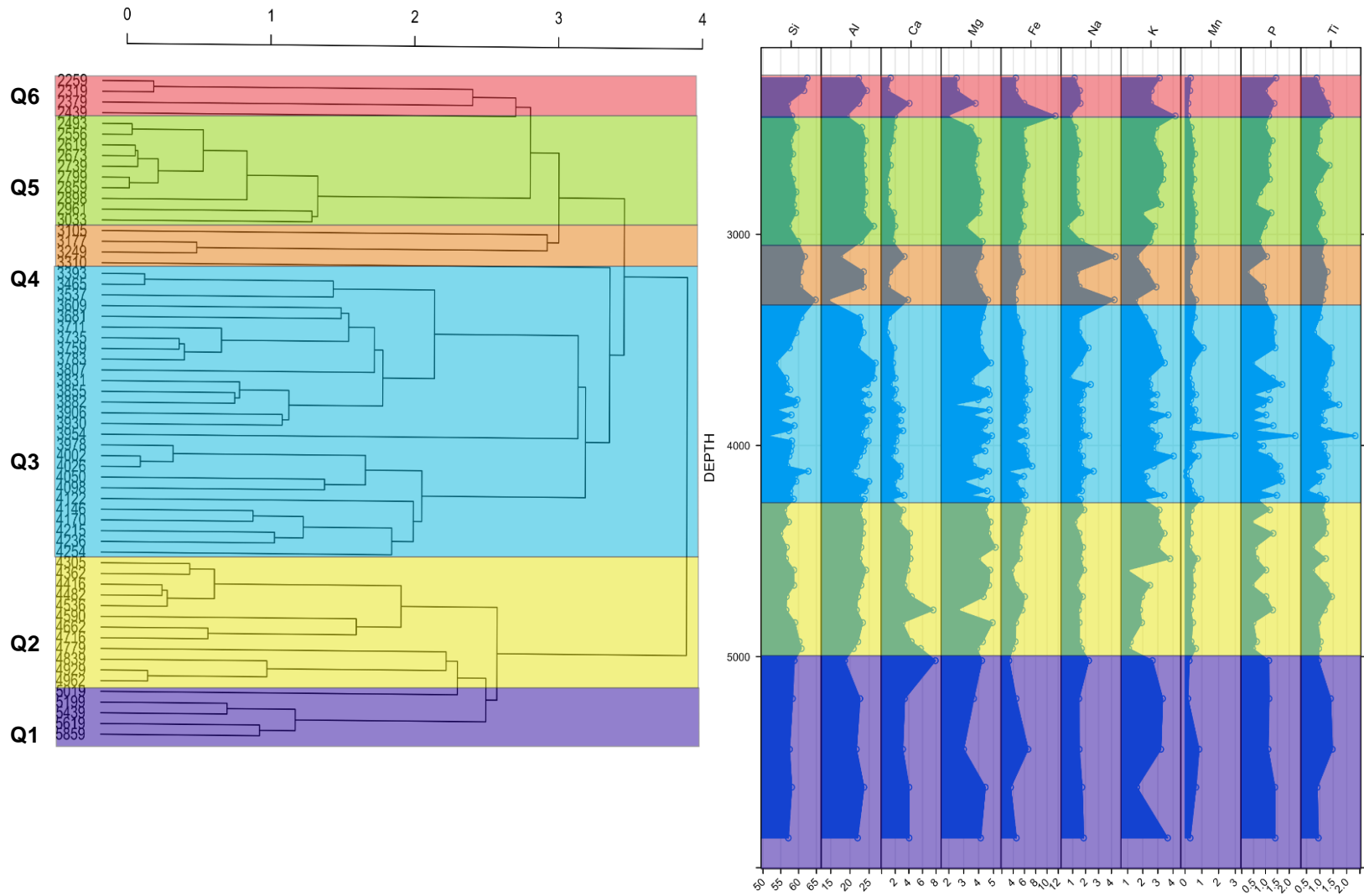
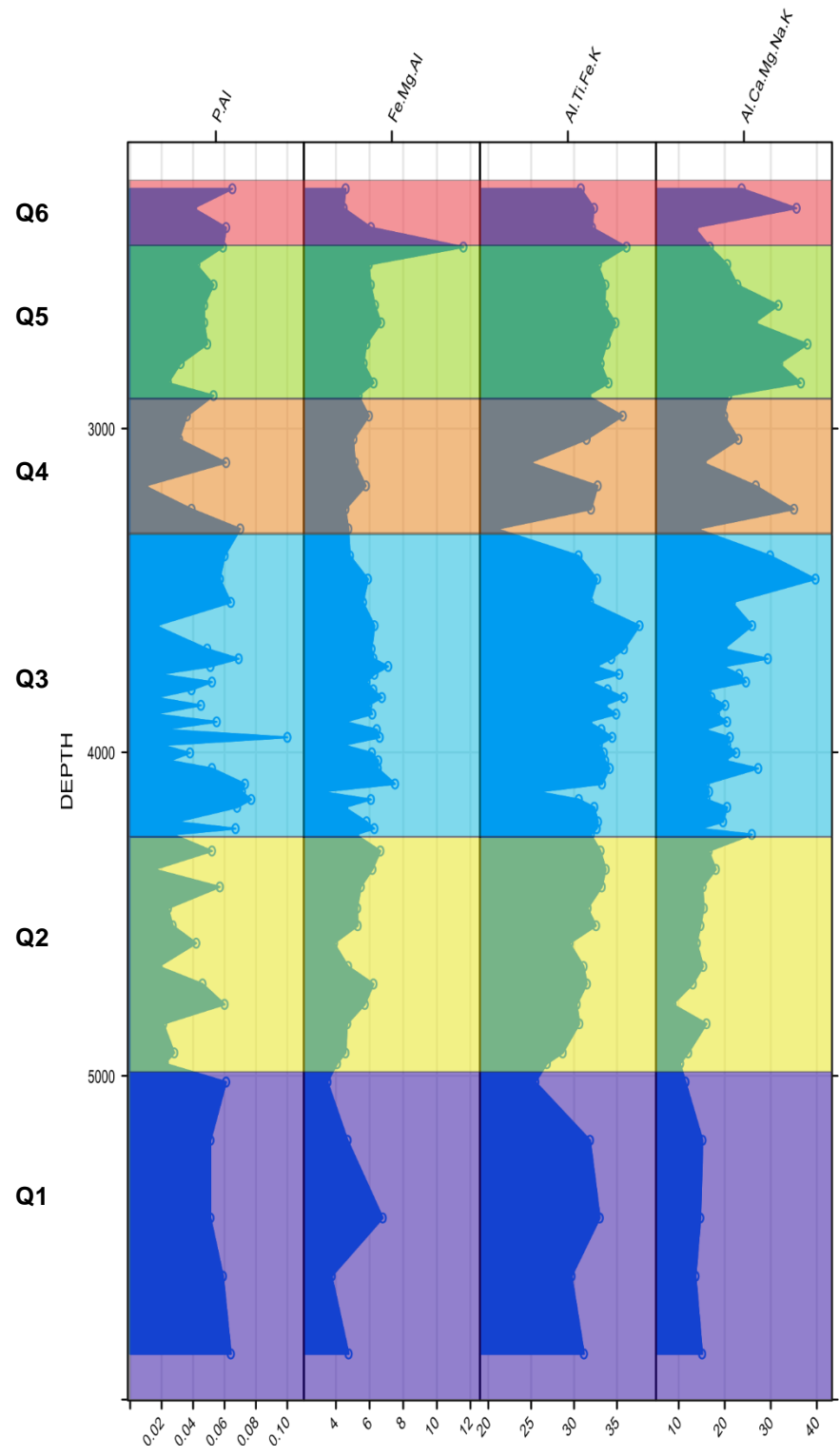


Figura 67. División de las curvas de tendencia de relaciones químicas, utilizando los intervalos de las quimiofacies de la figura 66.



Finalmente, se hizo un Análisis de Componentes Principales (PCA) con el fin de sugerir controles mineralógicos a partir de los elementos mayores y visualizar las qumiofacies obtenidas a partir del cluster (**Figura 68,69**). Su elaboración se realizó utilizando el software libre PAST, autor: Øyvind Hammer. La interpretación del PCA se hizo respecto biplot entre los componentes 1 y 2 (**Figura 68**).

Para generar el PCA, fue necesario antes aplicar a los datos la transformación CLR según lo visto en la **sección 5.3.3**. Los datos fueron transformados utilizando la función *Clr* del paquete *Composition de R*, autor: K. Gerald van den Boogaart. (**Tabla 5**).

Tabla 5. Datos de elementos mayores (wt%) transformados por Centered Log-Ratio.

DEPTH	Si	Al	Ca	Mg	Fe	Na	K	Mn	P	Ti
2259	3.099	2.071	-0.755	-0.109	0.460	-0.894	0.102	-2.150	-0.667	-1.158
2319	3.153	2.226	-1.140	-0.040	0.504	-0.532	-0.024	-2.229	-1.004	-0.914
2379	2.854	1.919	0.215	0.144	0.589	-0.722	-0.265	-2.925	-0.880	-0.929
2439	3.010	1.896	-0.405	-0.434	1.389	-1.337	0.373	-2.860	-0.926	-0.706
2493	2.990	2.046	-0.518	0.154	0.663	-0.921	-0.040	-2.131	-1.124	-1.119
2556	2.896	2.021	-0.663	0.226	0.616	-0.848	-0.163	-2.005	-0.909	-1.172
2619	2.934	2.022	-1.120	0.212	0.683	-0.720	0.013	-1.683	-1.032	-1.309
2673	2.887	1.999	-0.891	0.148	0.712	-0.923	0.051	-2.066	-1.059	-0.858
2739	2.953	2.055	-1.324	0.260	0.614	-0.846	0.092	-1.756	-0.958	-1.089
2799	3.058	2.152	-1.004	0.402	0.674	-0.777	0.033	-1.976	-1.284	-1.278
2859	3.021	2.117	-1.213	0.343	0.751	-0.752	0.111	-1.701	-1.620	-1.057
2898	2.906	1.977	-0.601	0.223	0.467	-0.686	-0.549	-1.693	-0.961	-1.083
2961	2.997	2.216	-0.381	0.078	0.715	-1.677	-0.019	-1.612	-1.100	-1.219
3033	2.970	2.011	-0.667	0.326	0.456	-0.611	-0.207	-1.846	-1.459	-0.972
3105	2.847	1.575	-0.068	0.147	0.309	0.182	-0.830	-1.711	-1.221	-1.229
3177	3.214	2.270	-0.698	0.416	0.836	-0.632	-0.057	-2.214	-2.489	-0.646
3249	3.077	2.134	-1.144	0.383	0.454	-0.602	0.038	-2.378	-1.110	-0.853
3310	2.907	1.372	0.088	0.267	0.219	0.177	-0.871	-1.713	-1.289	-1.156
3393	2.992	2.010	-1.077	0.340	0.420	-0.714	-0.351	-1.700	-0.803	-1.117
3465	3.032	2.105	-1.342	0.349	0.694	-0.647	-0.047	-2.072	-0.762	-1.309
3537	2.697	1.735	-0.761	0.068	0.335	-0.559	-0.244	-1.264	-1.013	-0.994
3609	2.827	2.131	-0.647	0.420	0.658	-0.688	0.084	-1.970	-2.021	-0.793
3681	2.980	2.215	-0.362	0.199	0.735	-1.442	-0.196	-2.460	-0.794	-0.875
3711	2.838	2.006	-1.036	0.066	0.609	-0.328	-0.286	-2.180	-0.666	-1.022
3735	2.859	1.906	-0.477	0.339	0.736	-0.660	-0.316	-2.138	-1.079	-1.171
3759	2.820	2.024	-0.588	0.361	0.615	-0.583	-0.113	-1.642	-1.981	-0.912
3783	2.963	1.997	-0.822	0.253	0.604	-0.660	-0.300	-2.213	-0.961	-0.862
3807	2.982	2.049	-0.251	-0.306	0.714	-0.843	-0.068	-2.521	-1.200	-0.557
3831	2.795	2.069	-0.058	0.364	0.692	-0.613	-0.378	-1.711	-2.059	-1.100
3855	2.859	1.935	-0.499	0.066	0.552	-0.803	0.103	-1.860	-1.175	-1.178
3882	2.782	2.002	-0.171	0.344	0.570	-0.642	-0.192	-1.464	-2.168	-1.061
3906	2.973	2.082	-0.424	0.384	0.365	-0.654	-0.279	-2.445	-0.819	-1.183
3930	2.941	2.030	0.036	0.302	0.725	-0.630	-0.160	-2.559	-1.872	-0.813
3954	2.339	1.526	-0.857	-0.008	0.260	-0.773	-0.458	-0.496	-0.781	-0.750
3978	2.991	2.139	-0.309	0.450	0.373	-0.699	-0.003	-2.052	-1.768	-1.123
4002	2.899	2.002	-0.659	0.219	0.624	-0.737	-0.171	-1.906	-1.263	-1.007
4026	2.998	2.098	-0.342	0.431	0.786	-0.746	-0.065	-2.614	-1.611	-0.935
4050	2.787	1.852	-1.033	-0.004	0.583	-0.686	0.135	-1.504	-1.111	-1.019
4098	2.807	1.854	-0.202	0.068	0.762	-0.731	-0.232	-2.610	-0.758	-0.959
4122	3.139	2.006	0.004	0.543	0.044	-0.040	-0.357	-3.397	-0.636	-1.306
4146	2.987	1.969	-0.076	0.342	0.682	-0.485	-0.264	-3.555	-0.589	-1.009
4170	2.983	2.117	-0.513	-0.021	0.376	-0.622	-0.363	-2.245	-0.570	-1.142
4215	2.969	2.094	-0.278	0.435	0.643	-0.554	-0.113	-1.978	-1.443	-1.776
4236	2.797	1.841	-0.053	-0.036	0.559	-1.123	-0.026	-1.841	-0.862	-1.256
4254	2.908	2.004	-0.852	0.419	0.436	-0.684	-0.466	-1.212	-1.605	-0.947
4305	2.762	1.850	-0.111	0.224	0.601	-0.632	-0.133	-2.275	-1.099	-1.188
4362	2.982	2.093	-0.122	0.502	0.720	-0.944	0.033	-2.309	-2.105	-0.851
4416	2.727	1.873	0.144	0.258	0.385	-0.865	-0.047	-2.392	-0.998	-1.085
4482	2.927	2.021	0.304	0.525	0.506	-0.530	-0.024	-2.545	-1.709	-1.474
4536	2.754	1.833	0.156	0.096	0.355	-0.807	0.058	-1.591	-1.773	-1.081
4590	2.990	2.102	0.249	0.477	0.221	-0.461	-1.156	-1.924	-1.061	-1.438
4662	2.954	2.012	0.086	0.425	0.389	-0.863	-0.214	-1.863	-2.015	-0.910
4716	2.771	1.830	0.215	0.201	0.532	-0.694	-0.603	-2.113	-1.240	-0.898
4779	2.830	1.875	0.823	-0.273	0.518	-0.823	-0.618	-2.350	-0.940	-1.043
4839	2.987	2.059	0.024	0.504	0.403	-0.672	-0.432	-1.877	-1.818	-1.178
4929	3.028	2.025	0.400	0.382	0.404	-0.656	-0.891	-2.106	-1.535	-1.049
4962	3.016	1.949	0.653	0.265	0.263	-0.568	-1.019	-1.552	-1.874	-1.133
5019	2.861	1.712	0.853	0.226	-0.031	-0.406	-0.243	-2.624	-1.081	-1.267
5199	2.917	1.970	0.071	0.152	0.361	-0.752	0.051	-2.950	-1.009	-0.810
5439	2.738	1.764	-0.179	-0.216	0.581	-0.899	-0.151	-1.500	-2.209	-0.928
5619	2.844	1.945	0.174	0.275	0.050	-0.672	-0.745	-1.661	-0.886	-1.324
5859	2.799	1.845	0.150	0.175	0.272	-0.630	0.047	-2.450	-0.903	-1.304

Figura 68. Diagrama PCA para los elementos mayores del Pozo-1.

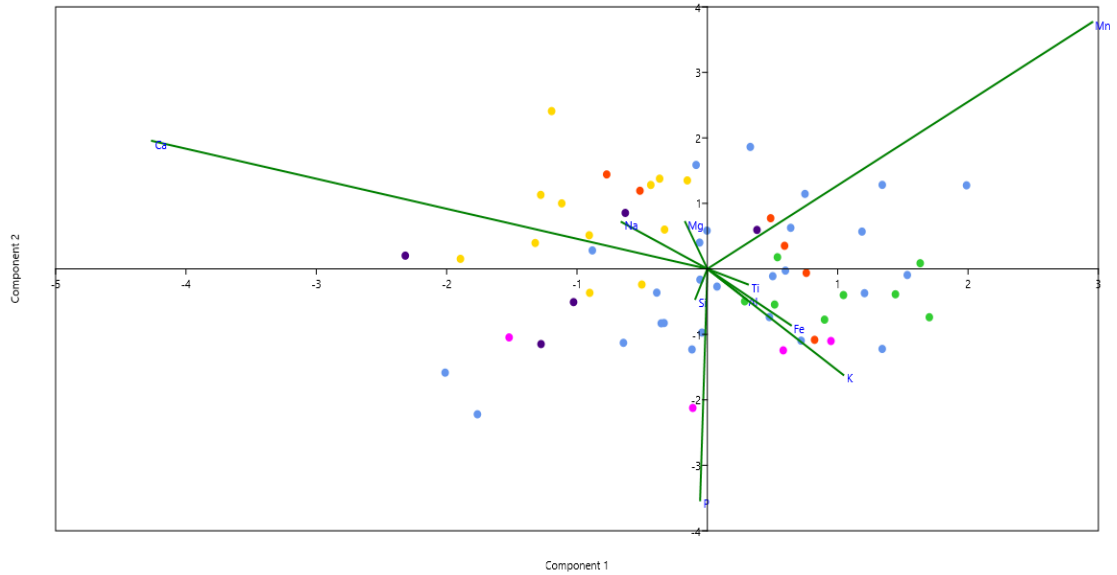
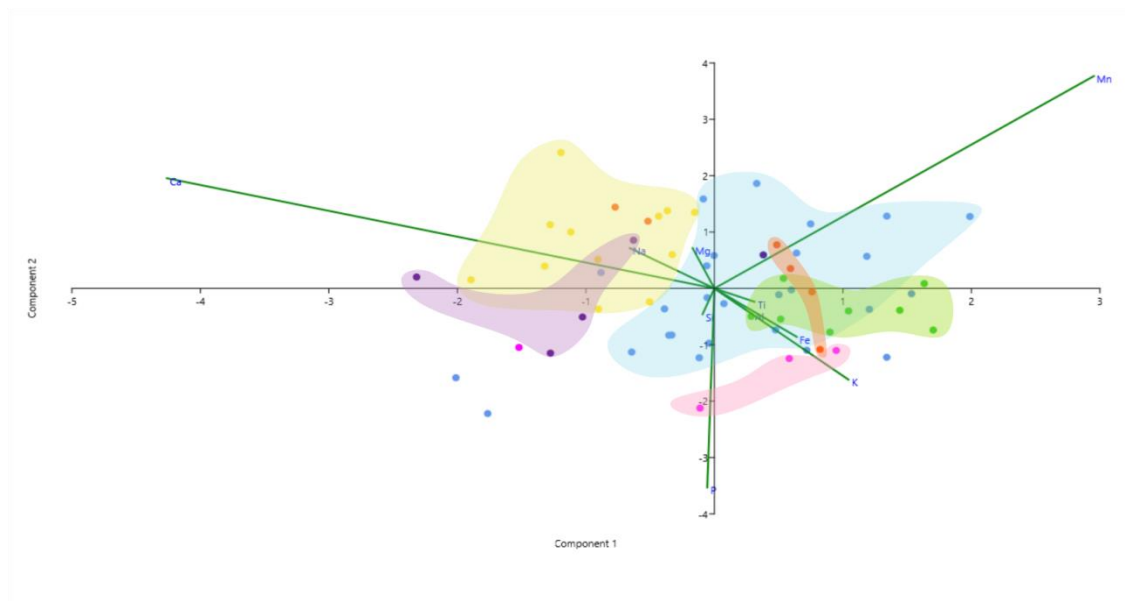








Figura 69. Delimitación de las quimiofacies en el diagrama de análisis de componentes principales (PCA).



Convenciones del análisis de componentes principales

Quimiofacies 6 	2259 ● 2319 ● 2379 ● 2439 ●		
Quimiofacies 5 	2493 ● 2556 ● 2619 ● 2673 ● 2739 ● 2799 ● 2859 ● 2898 ●		
Quimiofacies 4 	2961 ● 3033 ● 3105 ● 3177 ● 3249 ● 3310 ●		
Quimiofacies 3 	3393 ● 3465 ● 3537 ● 3609 ● 3681 ● 3711 ● 3735 ● 3759 ● 3783 ● 3807 ● 3831 ● 3855 ● 3882 ● 3906 ●	3930 ● 3954 ● 3978 ● 4002 ● 4026 ● 4050 ● 4098 ● 4122 ● 4146 ● 4170 ● 4215 ● 4236 ● 4254 ●	
		Quimiofacies 2 	4305 ● 4362 ● 4416 ● 4482 ● 4536 ● 4590 ● 4662 ● 4716 ● 4779 ● 4839 ● 4929 ● 4962 ●
		Quimiofacies 1 	5019 ● 5199 ● 5439 ● 5619 ● 5859 ●

El análisis de componentes principales arroja los resultados correspondientes a summary (**Tabla 6**), loadings (**Tabla 7**) y loadings plots (**Figuras 70 a 73**).

Tabla 6. 1. Tabla resumen con los eigenvalues y los porcentajes de varianza para cada componente principal en términos de la matriz de varianza. 2. Tabla resumen con los eigenvalues y los porcentajes de varianza para cada componente principal en términos de la matriz de correlación.

Varianza-Covarianza			Correlación		
PC	Eigenvalue	% varianza	PC	Eigenvalue	% varianza
1	0.36182	32.815	1	2.90073	29.007
2	0.297193	26.954	2	2.07807	20.781
3	0.201457	18.271	3	1.44649	14.465
4	0.112589	10.211	4	1.16898	11.69
5	0.0498771	4.5236	5	0.826136	8.2614
6	0.0402245	3.6482	6	0.646001	6.46
7	0.0216111	1.96	7	0.432241	4.3224
8	0.0139677	1.2668	8	0.354725	3.5472
9	0.00385581	0.3497	9	0.146625	1.4662
10	5.81E-20	5.27E-18	10	5.27E-19	5.27E-18

Tabla 7. Tabla con las cargas elementales de los componentes principales y su respectiva identificación (color rojo) en términos de las variables (elementos químicos).

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
Si	-0.017	-0.077	-0.121	-0.165	0.152	-0.245	0.030	-0.555	-0.679	0.316
Al	0.054	-0.076	-0.211	-0.077	0.339	-0.338	-0.135	-0.348	0.687	0.316
Ca	-0.791	0.329	0.050	0.384	0.076	0.098	0.023	-0.012	0.020	0.316
Mg	-0.032	0.120	-0.135	-0.424	0.398	-0.089	-0.229	0.662	-0.168	0.316
Fe	0.119	-0.145	-0.288	0.194	-0.147	-0.221	0.772	0.277	0.019	0.316
Na	-0.122	0.120	0.193	-0.671	-0.411	0.327	0.218	-0.153	0.190	0.316
K	0.194	-0.272	-0.375	0.215	0.109	0.751	-0.149	-0.053	-0.022	0.316
Mn	0.548	0.634	0.352	0.250	0.081	0.048	0.020	-0.049	-0.020	0.316
P	-0.010	-0.594	0.711	0.132	0.096	-0.043	-0.040	0.109	0.002	0.316
Ti	0.058	-0.040	-0.175	0.163	-0.692	-0.289	-0.509	0.121	-0.030	0.316

Figura 70. Diagrama de carga sobre el componente 1 (Calcio).

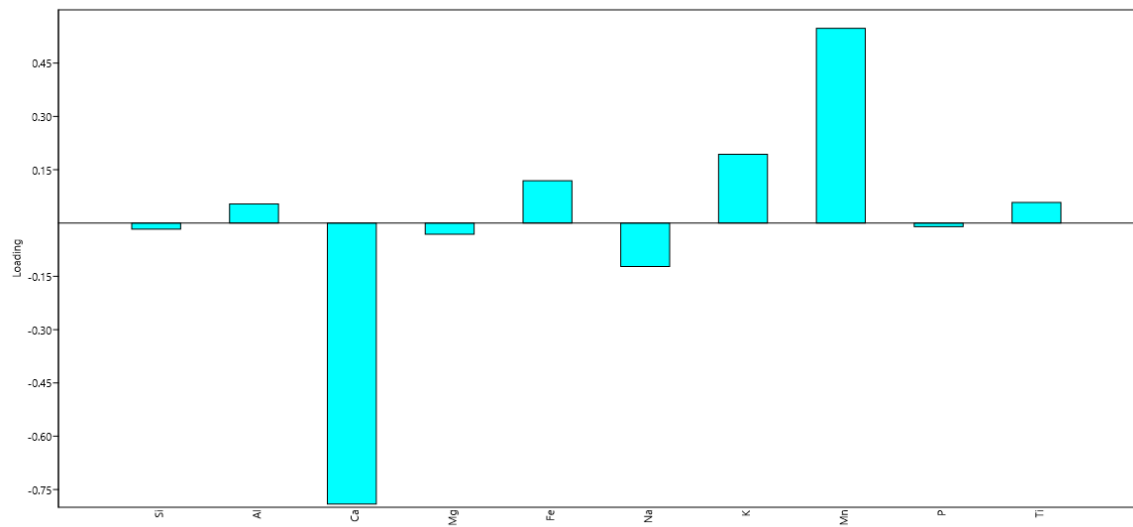


Figura 71. Diagrama de carga sobre el componente 2 (Manganeso).

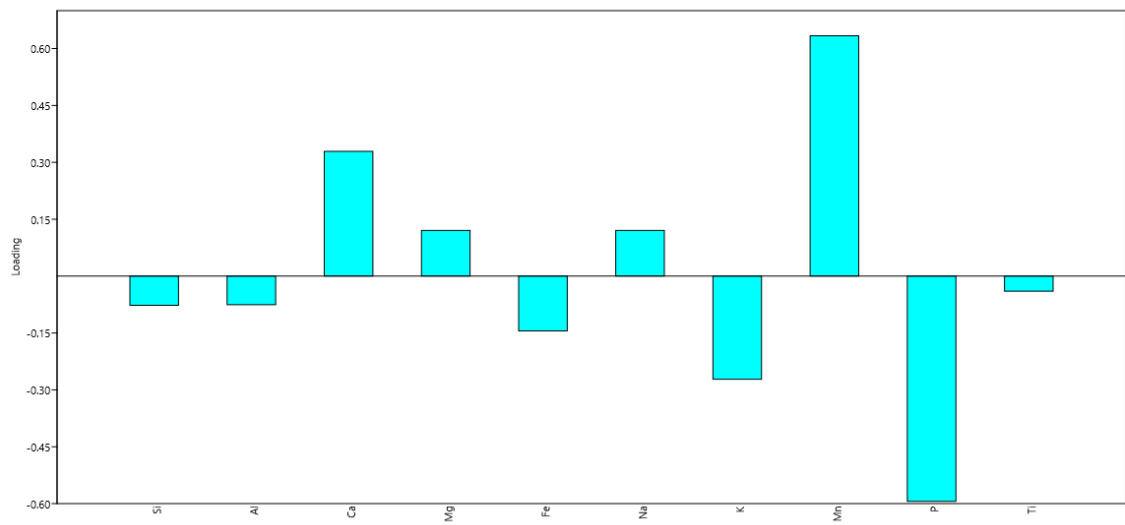


Figura 72. Diagrama de carga sobre el componente 3 (Fósforo).

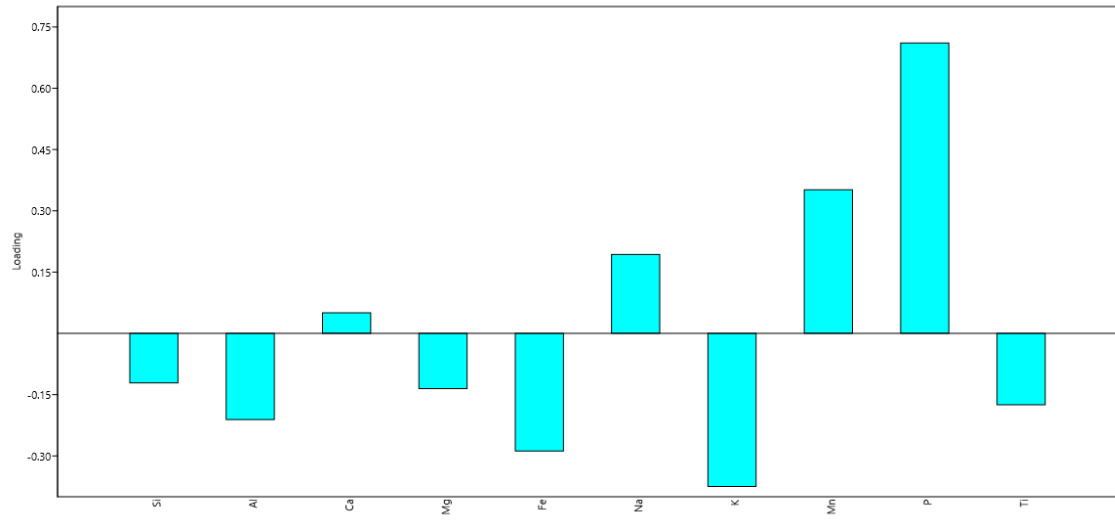
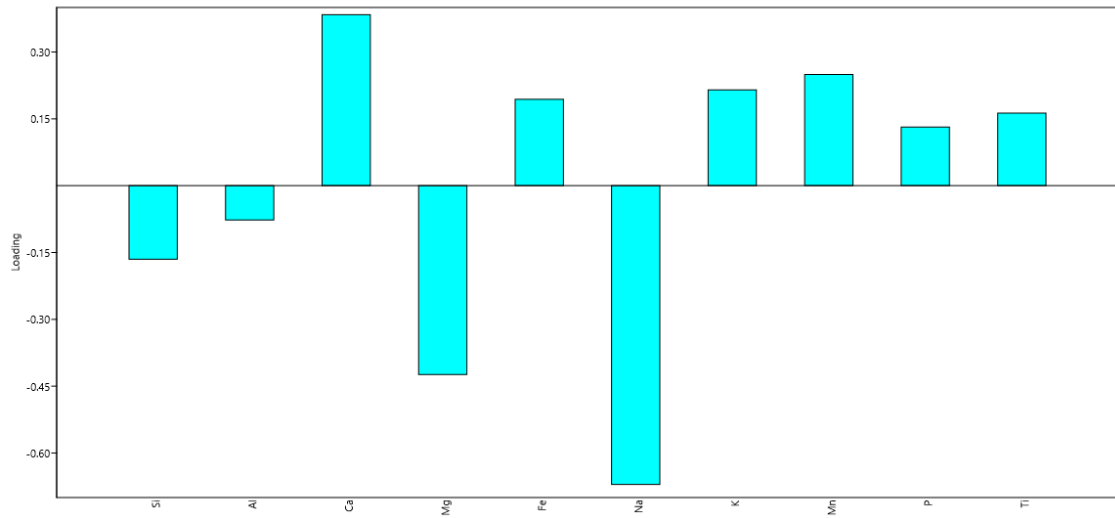


Figura 73. Diagrama de carga sobre el componente 4 (Sodio).



8. RESULTADOS

8.1 DESCRIPCIÓN DE LAS QUIMIOFACIES

Tras analizar las curvas de distribución de los elementos químicos en la vertical, en primera instancia por medio de la observación directa y luego complementadas por el cluster, se identificaron los intervalos de profundidades que corresponderían con las unidades químicas. De esta manera se sugieren seis quimiofacies descritas a continuación:

- **Q1 - Quimiofacies 1 (5019-5859 m)**

Esta quimiofacies presenta una tendencia de Si constante con valores medios de acuerdo a su rango de concentración. El Al mantiene valores entre medios a altos. El Ca muestra inicialmente valores medios, seguido de una leve disminución y un aumento significativo hacia el tope de esta quimiofacies. Elementos como el Fe, Ti y sobre todo el K, marcan un cambio a partir de los 5619 m de profundidad, donde sus concentraciones aumentan y progresivamente disminuyen hacia el tope de Q2. El Na mantiene valores bajos con un leve aumento hacia la parte superior de este intervalo. El Mg presenta altas concentraciones hacia la parte inferior, seguido de una disminución con valores medios y finalmente un aumento significativo hacia el tope de esta quimiofacies. El P muestra un porcentaje considerable de su concentración hacia la base de esta quimiofacies, seguido de valores medios con tendencia disminuir (**Figura 66**).

En esta quimiofacies se presentan valores bajos de la relación $Al/Ca+Mg+Na+K$ respecto a la quimiofacies 2, sin embargo, tiende a aumentar. Caso similar ocurre con el comportamiento del índice $Al+Ti+Fe+K$, el cual pareciera tener una correlación positiva con la relación $Al/Ca+Mg+Na+K$, pero para el caso del índice

RTi (Al+Ti+Fe+K), sus valores son relativamente altos en esta quimiofacies. La relación Fe+Mg/Al tiende a aumentar, pero luego disminuye considerablemente hacia el tope de este intervalo. La relación P/Al presenta una tendencia media constante (**Figura 67**).

- **Q2 - Quimiofacies 2 (4305-4962 m)**

La concentración de Si disminuye respecto a la quimiofacies 1. El Al muestra una tendencia de aumento con valores altos según su rango de concentración. El Ca disminuye hacia el tope de este intervalo, respecto a Q1. Por el contrario, el Mg aumenta significativamente respecto a Q1; los valores más altos de este elemento están presentes en esta quimiofacies (Q2). El Fe muestra dos ciclos repetitivos, donde inicialmente su concentración aumenta respecto a Q1, luego disminuye y enseguida se repite la tendencia anterior. El porcentaje de Na mantiene una tendencia con valores bajos constantes, similar al comportamiento en Q1. La concentración de K aumenta progresivamente con relación a Q1. El Mn presenta bajos valores los cuales mantienen una tendencia constante respecto a Q1. El P por su parte disminuye con relación a Q1 y mantiene cambios entre valores bajos a medios. Por último, el Ti disminuye hacia la base de esta quimiofacies, pero tiende a aumentar hacia el tope (**Figura 66**).

En esta quimiofacies la relación Al/Ca+Mg+Na+K aumenta progresivamente hacia el tope, igualmente ocurre con la concentración del índice RTi. La relación Fe+Mg/Al aumenta, mientras que los valores de P/Al disminuyen con relación a Q1 (**Figura 67**).

- **Q3 - Quimiofacies 3 (3393-4254 m)**

En esta quimiofacies la concentración del Si aumenta hacia la base de este intervalo, seguido de una leve disminución y de nuevo un aumento hacia el tope. El Al aumenta gradualmente respecto a Q2, hasta alcanzar sus máximos valores en comparación con las demás quimiofacies. El contenido de Ca disminuye

gradualmente de base a tope. Los valores de la concentración de Mg son altos en esta quimiofacies y mantienen la tendencia de Q2. El Fe tiende a aumentar respecto a Q2 y se mantienen valores medios relativamente constantes. El Na no muestra mayores cambios con relación a Q2. El K conserva los valores medios a altos traídos por Q2, pero hacia el tope de Q3 dichos valores pasan a ser bajos. Elementos como el P y Ti mantienen una tendencia de valores medios a altos, siendo mayores respecto a Q2 (**Figura 66**).

En cuanto a las relaciones químicas, se evidencia el marcado aumento de la relación $Al/Ca+Mg+Na+K$ respecto a las quimiofacies 2 y 1. El índice $Al+Ti+Fe+K$ (RTi) aumenta con relación a Q2 y presenta en esta quimiofacies sus valores más altos. Los valores de la relación $Fe+Mg/Al$ son en gran parte medios y disminuyen hacia el tope de Q3. La relación P/Al tiende a aumentar respecto a Q2, sus porcentajes son variables cambiando de bajos hasta altos (**Figura 67**).

- **Q4 - Quimiofacies 4 (2961-3310 m)**

La concentración de Si en Q4 disminuye gradualmente hacia el tope respecto a Q3. El Al disminuye respecto a la tendencia traída por Q3, sin embargo, hacia la parte superior de Q4, el porcentaje de Al aumenta. El Ca aumenta con relación a Q3; esta misma respuesta se evidencia en los valores de Na, los cuales son los más altos a diferencia de las demás quimiofacies. El Mg presenta concentraciones medias a altas con una disminución hacia el tope de Q4. El Fe mantiene la tendencia traída por Q3 y muestra un leve aumento hacia la parte superior. El Ti aumenta respecto a Q3 y mantiene valores medios. Los valores de K aumentan respecto a la tendencia traída por Q3, sin embargo, dichos valores varían desde bajos a medios. Los porcentajes de P disminuyen respecto a Q3 y los valores de Mn mantienen una tendencia constante con relación a Q3 (**Figura 66**).

En esta quimiofacies, la relación $Al/Ca+Mg+Na+K$ disminuye respecto a Q3. El índice $Al+Ti+Fe+K$ disminuye con relación a Q3, pero tiende a aumentar hacia el tope de Q4. La relación $Fe+Mg/Al$ disminuye respecto a Q3 y mantiene valores bajos constantes en este intervalo. Por otra parte, la relación P/Al disminuye respecto a la tendencia traída por Q3 (**Figura 67**).

- **Q5 - Quimiofacies 5 (2493-2898 m)**

La mayoría de concentraciones elementales permanecen constantes en esta quimiofacies, como es el caso del Si con porcentajes medios respecto a Q4, el Al con valores altos y una tendencia mayor con relación a Q4, el Mg con valores medios y una tendencia de aumento con respecto a Q4, el Fe con porcentajes medios y conservando la tendencia traída por Q4, el Na y Ca con concentraciones bajas y disminuyendo respecto a Q4, y el Mn con valores bajos y conservando la tendencia con relación a Q4. El K aumenta y por lo mismo tiene valores más altos respecto a la tendencia de Q4. El P y el Ti tienden a aumentar respecto a Q4 (**Figura 66**).

La relación $Al/Ca+Mg+Na+K$ aumenta significativamente respecto a Q4 y disminuye gradualmente hacia el tope de Q5. El índice $Al+Ti+Fe+K$ presenta altos valores respecto a Q4, manteniendo dicha tendencia en toda esta quimiofacies. La relación $Fe+Mg/Al$ mantiene una tendencia media constante al igual que en Q4 y un aumento hacia la parte superior de Q5. La relación P/Al intenta aumentar en dirección al tope de Q6 (**Figura 67**).

- **Q6 - Quimiofacies 6 (2259-2439 m)**

En esta quimiofacies ocurre un aumento en el contenido de Si con relación a Q5. El Al aumenta respecto a la tendencia traída en Q5, sin embargo, la concentración del Al en ambas quimiofacies presenta valores altos. El Ca aumenta con relación a Q5 y marca un descenso hacia el tope de Q6. EL Mg aumenta respecto a la tendencia traída en Q5, pero hacia la parte superior de este intervalo disminuye. El

Fe presenta su valor de concentración más alto en esta quimiofacies y por tal motivo aumenta respecto a Q5, sin embargo, este aumento solo ocurre en el límite con la quimiofacies 5, pues hacia el tope de Q6, los porcentajes disminuyen gradualmente. El Na muestra valores bajos y mantiene la tendencia de Q5. El K presenta varios cambios en este intervalo, comenzando por un aumento con relación a Q5, seguido de una disminución y nuevamente un aumento hacia la parte superior de Q6. El Mn disminuye respecto a Q5, al igual que el Ti. Por último, el P conserva los valores y la tendencia media de Q5 (**Figura 66**).

En cuanto a las relaciones químicas, el índice Al+Ti+Fe+K imita la tendencia constante de valores medios de Q5. La relación Al/Ca+Mg+Na+K aumenta significativamente con relación a Q5, pero tiene un marcado descenso hacia la parte superior de esta quimiofacies. La relación Fe+Mg/Al aumenta respecto a Q5, y disminuye progresivamente hacia el tope de Q6. La relación P/Al mantiene la tendencia traída en Q5 y presenta valores medios (**Figura 67**).

8.2 DESCRIPCIÓN DE LA MATRIZ DE CORRELACIÓN

En la matriz de correlación, los elementos que muestran una correlación inversa con el Si son el Al, con una correlación negativa media, y el Fe, K, Mn y Ti, con una correlación negativa débil respecto a dicho elemento. Considerando ahora el Al, está el Ca con una correlación negativa débil y el Na con una correlación negativa media. Respecto al Ca, y con una correlación negativa débil, está el K. El Mg presenta una débil correlación negativa con el P, Fe y K, así mismo es la correlación del Fe con el Na, y de este último con el K (**Figura 64**).

Elementos que presentan una correlación directa son el Si y el Na, los cuales tienen una correlación positiva débil. La correlación del Al vs. el K es positiva débil, al igual que la correlación entre el Ca y el Na, y del Mg con el Na. El Fe y el K dejan ver una correlación positiva media, igualmente ocurre con la correlación entre el Mn y el Ti. Finalmente, las correlaciones Fe vs. Ti, Na vs. Mn y K vs. Ti, son positivamente débiles (**Figura 64**).

8.3 DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Los resultados del PCA sugieren que el componente principal 1 (PC1) explica el 33% de la varianza de los datos, el PC2 tiene un valor de varianza del 27%, el PC3 del 18% y el PC4 del 10% (**Tabla 6.1**). La tabla con los valores de carga muestra que el Ca está asociado al PC1 con un loading de -0.791 (**Tabla 7**), y con un eigenvalue de 0.36 respecto a la matriz de varianza-covarianza (**Tabla 6.1**); el Mn está asociado al PC2 con un loading de 0.634 (**Tabla 7**), y un eigenvalue de 0.30 (**Tabla 6.1**); el P está asociado al PC3 con un loading de 0.711 (**Tabla 7**), eigenvalue de 0.20 (**Tabla 6.1**); por último, el Na está asociado al PC4 con un loading de -0.671 (**Tabla 7**), y un eigenvalue de 0.11 (**Tabla 6.1**).

Estos cuatro elementos tienen un eigenvalue superior a 1 respecto a la matriz de correlación (**Tabla 6.2**), criterio que menciona Carmona (2014)¹⁴⁵ como ideal para elegir las variables que controlan los datos; adicionalmente, suman una varianza del 88%, por lo que se escogieron como los componentes principales que controlan la variabilidad del set de datos.

¹⁴⁵ CARMONA, Francesc. Un ejemplo de ACP paso a paso. Departament d'Estadística. 13 de enero de 2014. Disponible en: <http://www.ub.edu/stat/docencia/Mates/ejemploACP.PDF>

9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. MINERALOGÍA

- **Q1 - Quimiofacies 1 (5019-5859 m)**

En lo que a mineralogía se refiere, se puede sugerir que en esta quimiofacies hay presencia de calcita, especialmente hacia el tope de este intervalo. Evidencia de lo anterior se reporta en los resultados de DRX¹⁴⁶ para las muestras 5199 m, 5619 m y 5859 m (**ver anexo A**); también se presenta siderita cálcica y magnesiana a los 5199 m de profundidad. Adicionalmente, los análisis petrográficos¹⁴⁷ reportan la presencia de anfíboles y plagioclasa (que para este caso podría ser anortita), lo que es coherente con los resultados de geoquímica inorgánica de este trabajo.

Los altos valores de Mg en Q1 se pueden ver manifestados en la presencia de siderita magnesiana, clinocloro, vermiculita y montmorillonita, minerales reportados en el análisis de DRX¹⁴⁸ (**ver anexo A**) de muestras comprendidas en este intervalo. Estos aportes de Mg pueden también ser atribuidos a la presencia de biotita y anfíboles, minerales señalados por petrografía. La relación Fe+Mg/Al propuesta por Ratcliffe et al. (2010)¹⁴⁹, imita el contenido de siderita, valores que para esta quimiofacies pueden ser considerados.

El K también muestra porcentajes de concentración significativos, lo que sugiere la presencia de feldespatos, específicamente microclina según el informe de DRX¹⁵⁰ (**ver anexo A**), el cual también reporta moscovita, mineral que contiene dicho

¹⁴⁶ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X

¹⁴⁷ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit.

¹⁴⁸ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

¹⁴⁹ RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010, Op. Cit.

¹⁵⁰ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

elemento en su fórmula química. De acuerdo a Naranjo et al. (2015)¹⁵¹, en la petrofacies A se incluyen litologías como arcosas y lodolitas feldespáticas, lo que coincide con la información suministrada por los análisis de geoquímica inorgánica de este trabajo.

Trayendo a mención el análisis de componentes principales (PCA), los puntos que corresponden a la quimiofacies 1 se sitúan en los cuadrantes 2 y 3 del PCA, sugiriendo al Ca, Mg, Na, P y Si como elementos característicos.

- **Q2 - Quimiofacies 2 (4305-4962 m)**

El contenido de Mg en esta quimiofacies se ve influenciado muy seguramente por la presencia de minerales como la montmorillonita, vermiculita, phillipsita, siderita magnesiana y el clinocloro, los cuales son reportados en los análisis de DRX¹⁵² (**ver anexo A**). La calcita muy posiblemente se encuentre hacia la base de esta quimiofacies, donde la concentración de Ca es alta. Dicha concentración también puede estar controlada por la presencia de siderita cálcica y phillipsita cálcica. El aumento de K en esta quimiofacies puede deberse a moscovita, microclina y phillipsita, minerales reportados por DRX (**ver anexo A**). Se sugiere el aumento de Al en Q2 a causa del contenido de caolinita que se reporta por DRX, donde dicho mineral señala los porcentajes más altos a diferencia de la caolinita contenida en las demás muestras analizadas por difracción.

Teniendo en cuenta el análisis de componentes principales, la quimiofacies 2 se ubica principalmente en el cuadrante 2, sugiriendo como minerales característicos al Ca, Mg y Na. Dichos elementos, a excepción del Na, coinciden con los elementos de concentraciones contrastantes descritos para la quimiofacies 2.

¹⁵¹ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit.

¹⁵² UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

- **Q3 - Quimiofacies 3 (3393-4254 m)**

El aumento de Si hacia el tope de Q3 se evidencia en los resultados de DRX, donde el valor de Cuarzo para la muestra 3393 m es del 48%, siendo este el mayor porcentaje de Si de las muestras analizadas por difracción. La concentración de Al aumenta en esta quimiofacies, especialmente hacia el tope, lo que puede sugerir un mayor contenido de minerales de arcilla, en gran parte del grupo del caolín. Minerales reportados por DRX¹⁵³ (**ver anexo A**) con presencia de Al está la albita, moscovita, clinocloro, caolinita, microclina, montmorillonita y halloysita. Adicionalmente, los análisis petrográficos¹⁵⁴ reportan en las petrofacies B y C abundancia de arcillolitas y lodolitas, además de un aporte de líticos sedimentarios arcillosos, razones que ayudan a respaldar el aumento de Al en esta quimiofacies.

El contenido de Fe según lo descrito en la sección 8.1., puede sugerir aportes de pirita o minerales ferrosos. Lo mencionado para el P en dicha sección, sugiere un aporte de fosfatos, lo cual es respaldado por los valores de la relación P/Al. Este cociente es planteado en Einsele et al. (1991)¹⁵⁵, donde se menciona que altos valores se debe a flujos fosfáticos por restos de peces y/o fósforo orgánico en el fondo marino. Sin embargo, el aporte de fosfatos no solo se debe a restos de peces, según Einsele et al. (1991)¹⁵⁶, dichas concentraciones también están asociadas a conchas de foraminíferos plantónicos y otros componentes calcáreos. Razón de lo anterior se reporta en los resultados bioestratigráficos, donde Rincón et al. (2016)¹⁵⁷ mencionan un aumento considerable de foraminíferos plantónicos en profundidades que son comprendidas en esta quimiofacies. Esta observación también es coherente con lo reportado en los análisis petrográficos, ya que

¹⁵³ *Ibíd.*

¹⁵⁴ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, *Óp. Cit.*

¹⁵⁵ EINSELE, RICKEN, SEILACHER, *Op. Cit.*

¹⁵⁶ *Ibíd*

¹⁵⁷ RINCÓN, RESTREPO, BEDOYA, VARGAS, RODRÍGUEZ, *Óp. Cit.*

Naranjo et al. (2015)¹⁵⁸, mencionan la presencia de bioclastos en la petrofacies B (3807-4152 m).

Los altos valores de Ti en esta quimiofacies pueden deberse a la presencia de óxidos de titanio como el rutilo y/o la anatasa. Las concentraciones de K también son significativas en Q3, sugiriendo la presencia de feldespatos. Evidencia de ello se menciona en la petrofacies B, donde según Naranjo et al. (2015)¹⁵⁹, se incrementa el contenido de feldespatos. Otros minerales que presentan K en su composición y que se encuentran reportados en los resultados de DRX¹⁶⁰ (**ver anexo A**), son la moscovita y la microclina.

Respecto al PCA, los puntos de la quimiofacies 3, se ubican en todos los cuadrantes, pero especialmente en 1, 3 y 4, sugiriendo que esta quimiofacies se caracteriza por las concentraciones de Si, Al, P, Fe, Ti, K, Mn.

- **Q4 - Quimiofacies 4 (2961-3310 m)**

En esta quimiofacies las concentraciones sobresalientes de Ca pueden deberse a contenidos de calcita, conchas de foraminíferos u otro material calcáreo. Esta asunción se ve respaldada por los resultados de DRX¹⁶¹ (**ver anexo A**) para las muestras 3033 m y 3177 m, las cuales reportan contenidos de calcita y una de ellas siderita cálcica. Adicionalmente, el estudio bioestratigráfico realizado por Rincón et al. (2016)¹⁶², menciona la abundancia de foraminíferos en el intervalo 2961 m – 3681 m, profundidades que coinciden con el rango comprendido en la quimiofacies 4.

Las marcadas concentraciones de Na en Q4 posiblemente se deban a la presencia de albita. Evidencia de ello se reporta en los análisis DRX¹⁶³ (**ver**

¹⁵⁸ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit.

¹⁵⁹ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit.

¹⁶⁰ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

¹⁶¹ *Ibíd.*

¹⁶² RINCÓN, RESTREPO, BEDOYA, VARGAS, RODRÍGUEZ, Óp. Cit.

¹⁶³ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

anexo A), donde aparece el contenido de albita, microclina y montmorillonita, minerales que contiene Na en su fórmula química.

La tendencia de aumento con valores medios mostrada por el Ti, puede deberse al contenido de óxidos de titanio como el rutilo y/o la anatasa. Lo anterior es coherente con el reporte de anatasa en la muestra 3033 m del informe de DRX¹⁶⁴ **(ver anexo A)**. Por otra parte, la tendencia mantenida de valores altos de Mg se relaciona a los contenidos de clinocloro, vermiculita, montmorillonita y siderita magnesiana reportados por los análisis de DRX.

El PCA sugiere un control de Ti, Al, Fe y K para la quimiofacies 4, la cual se sitúa en los cuadrantes 1 y 4 de este diagrama.

- **Q5 - Quimiofacies 5 (2493-2898 m)**

Los valores altos y casi constantes del Al puede deberse a que esta quimiofacies coincide litológicamente con un gran paquete de lodolitas. Además de esto, los resultados de DRX¹⁶⁵ **(ver anexo A)** reportan varios minerales que contiene Al en su composición, los cuales son halloysita, gibbsita, albita, moscovita, clinocloro, caolinita, vermiculita, microclina y montmorillonita.

En este intervalo, los porcentajes de Mg se caracterizan por la presencia de minerales como la montmorillonita, la siderita magnesiana, magnesiohornblenda, phillipsita, vermiculita y clinocloro¹⁶⁶ **(ver anexo A)**. El Fe tiende a ser alto al igual que el K, sugiriendo aportes de minerales ferrosos y feldespatos respectivamente. Entre los minerales encontrados por el análisis de DRX¹⁶⁷ **(ver anexo A)** está el clinocloro, la vermiculita, la siderita, pirita y hornblenda para el caso del Fe, y por el K está la moscovita, la microclina y phillipsta.

¹⁶⁴ *Ibíd.*

¹⁶⁵ *Ibíd.*

¹⁶⁶ *Ibíd.*

¹⁶⁷ *Ibíd.*

Las muestras pertenecientes a la quimiofacies 5 se sitúan en el cuadrante 1 y 4 del PCA, proponiendo un control del K, Al, Ti, Fe, y Mn.

- **Q6 - Quimiofacies 6 (2259-2439 m)**

El aumento de Si sugiere un mayor aporte de cuarzo y minerales silicatados, también puede deberse a la existencia de intervalos con litologías arenosas como se muestra respectivamente en la columna litológica del Pozo-1 para esta quimiofacies. El aumento de Ca en Q5 sugiere un contenido de calcita, conchas de foraminíferos (bioclastos) y/o materiales calcáreos que pueden estar formando cemento en la roca. Hacia la base de Q6 se marcan altos valores de Mg, seguido del Fe y el K, lo que podría sugerir la presencia de biotita, phillipsita, hornblenda, vermiculita, entre otros. Para esta quimiofacies, el comportamiento de la relación $Fe+Mg/Al$ sugiere la presencia de siderita en el límite entre Q5 y Q6.

Respecto al PCA, los puntos correspondientes a las muestras de la quimiofacies 6, se ubican en el cuadrante 3 y 4, lo que sugiere que esta quimiofacies se caracteriza por el Si, P, Fe, K, Al y Ti elementos que influenciaron la delimitación del intervalo Q1.

9.2. CAMBIOS EN LA PROVENIENCIA: PALEOCLIMA DEL ÁREA FUENTE Y APOORTE DE MATERIAL TERRÍGENO

Las condiciones químicas del medio se ven afectadas por la meteorización, la cual a su vez está condicionada al clima, pues las precipitaciones hacen que el sedimento se meteorice más rápido. Estas condiciones pueden ser relativamente medidas bajo la relación $Al/Ca+Mg+Na+K$ propuesta por Ratcliffe et al. (2014)¹⁶⁸,

¹⁶⁸ WRIGHT, RATCLIFFE, 2004, Op. Cit.

que para este trabajo recibirá el nombre de indicador del grado de meteorización (IM).

Para la sucesión sedimentaria analizada del Pozo-1, se observa claramente un aumento gradual desde la quimiofacies 1 hasta la quimiofacies 6, donde el IM parte de valores bajos hasta alcanzar altos valores y cambios contrastantes en la columna sedimentaria. Esto podría sugerir que la meteorización comenzó a ser más intensa a partir del tope de Q3 hasta Q6, indicando mayores precipitaciones en esta dirección. Razón de lo anterior es mencionado por Naranjo et al. (2015)¹⁶⁹, quienes afirman una baja meteorización registrada en la petrofacies A (5205-5844 m).

Adicionalmente, el índice RTi (Al+Ti+Fe+K) propuesto por Ratcliffe et al. (2012)¹⁷⁰, da idea de la cantidad de material terrígeno en el sedimento. La curva de tendencia se muestra ascendente, sin embargo, los altos valores en casi toda la columna sedimentaria sugieren un gran aporte de material terrígeno. Dicho índice coincide con el comportamiento de IM, lo que estaría indicando que las condiciones del área fuente de donde proviene este material continental, tuvo un grado de meteorización considerable a partir de Q3.

Una evidencia de lo mencionado anteriormente, es planteada por el Grupo de Bioestratigrafía-Palinología, ICP (2015)¹⁷¹, quienes mencionan que el aporte de materia orgánica de tipo continental es bastante alto a lo largo de casi toda la sección, adicionalmente, proponen que dicha materia orgánica es próxima a una fuente fluvial debido a un gran aporte de fitoclastos.

¹⁶⁹ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit

¹⁷⁰ RATCLIFFLE, WOODS, RICE, 2012, Op. Cit.

¹⁷¹ GRUPO DE BIOESTRATIGRAFÍA-PALINOLOGÍA. Reporte Palinológico. Informe interno ECOPEPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2015.

Las condiciones del área fuente planteadas favorecen la formación de caolinita, ya que según Ratcliffe et al. (2010)¹⁷², las arcillas caoliníticas en un entorno fluvial son típicas de climas cálidos y húmedos. Lo anterior es coherente con los resultados de DRX¹⁷³ (**ver anexo A**), los cuales reportan contenidos de caolinita en todas las muestras analizadas, siendo en la mayoría un porcentaje considerable.

9.3. INTEGRACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS

Teniendo en cuenta los estudios previos en el Pozo-1, y su integración con los resultados de geoquímica inorgánica llevados a cabo en este trabajo (**Figura 74 - ver anexo E**), se observó que la quimiofacies 1 concuerda con la biozona 1 y con la base de la biozona 2, además, coincide con la edad 1 y la petrofacies A. La quimiofacies 2 coincide con la biozona 2 y la base de la biozona 3; esta quimiofacies también coincide con la edad 1. La quimiofacies 3 se ajusta en su mayoría a la biozona 3 y totalmente a la edad 1; dentro de Q3 se encuentran las petrofacies B y C. La quimiofacies 4 encaja con la biozona 4 y la edad 2. La quimiofacies 5 concuerda con la biozona 5 y 6, y coincide con las edades 3 y 4. Finalmente, se observó que la quimiofacies 6 se ajusta a la biozona 6 y corresponde a la edad 4.

Con base en el cambio planteado entre Q1 y Q2, el límite superior de la petrofacies A (5205-5844 m), propuesto por Naranjo et al. (2015)¹⁷⁴, se podría extender hasta los 5000 m de profundidad, ya que en los datos de geoquímica inorgánica del presente trabajo el cambio se comienza a notar desde la

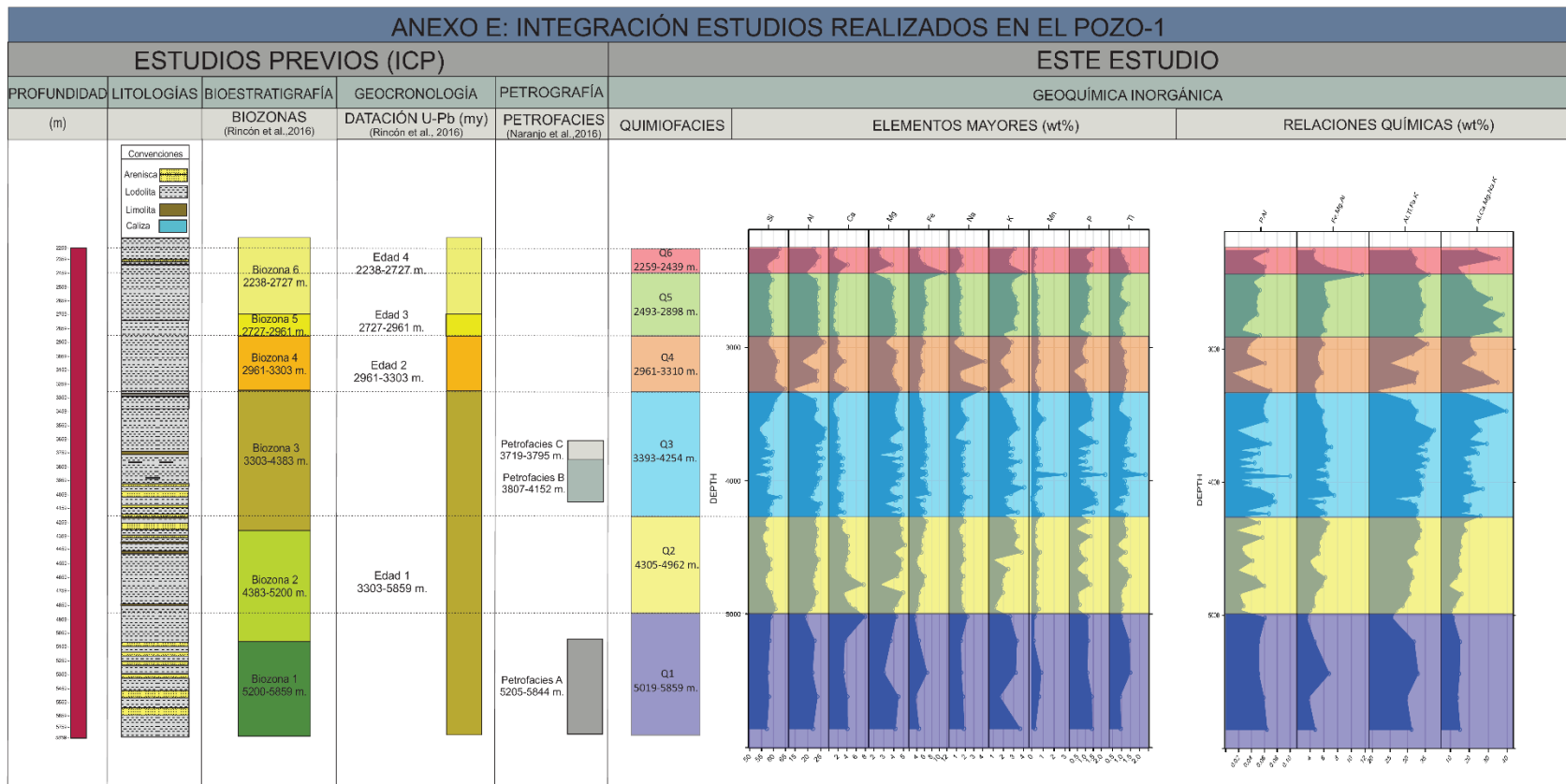
¹⁷² RATCLIFFE, WRIGHT, MONTGOMERY, PALFREY, VONK, VERMEULEN, BARRETT, 2010, Óp. Cit.

¹⁷³ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Óp. Cit.

¹⁷⁴ NARANJO, PARRA, JEREZ, MEZA, 2015, Óp. Cit.

profundidad sugerida. Si bien es cierto que no se realizaron secciones delgadas de profundidades entre 5000 m y 5205 m, sería conveniente realizar análisis petrográficos en dicho intervalo para corroborar la sugerencia planteada.

Figura 74. Integración de los estudios realizados en el Pozo-1.



10. CONCLUSIONES

Los resultados arrojados por los análisis de geoquímica inorgánica son coherentes con los estudios de otras técnicas aplicadas en el Pozo-1, como petrografía, palinología y difracción de rayos X. Esto y otras bondades como rapidez, portabilidad, costos y eficiencia, son razones valiosas para considerar hacer estudios quimioestratigráficos utilizando la técnica EDS.

Se identificaron seis quimiofacies en la sucesión sedimentaria que comprende el Pozo-1.

La sucesión sedimentaria del Pozo-1 cuenta con un alto aporte de material terrígeno. Este material continental estuvo bajo un régimen de meteorización considerable a partir de la quimiofacies 3, lo que permite deducir que las condiciones del área fuente estuvieron afectadas por constantes precipitaciones.

Se concluye que la mayoría de la sucesión sedimentaria correspondiente al Pozo-1, presenta contenidos considerables de caolinita, debido a que las condiciones del área fuente favorecen su formación.

Se sugiere un cambio de proveniencia a partir de los 5000 m de profundidad, evidenciado en los aumentos de potasio, titanio y el alto contenido de material terrígeno marcado por el índice RTi.

La adquisición de datos químicos elementales utilizando la técnica EDS, mediante el ensamblaje de un microscopio petrográfico de alta resolución y no usando un SEM, refleja un alto grado de incertidumbre en los elementos menores, traza y

tierras raras. Sin embargo, es importante hacer pruebas interlaboratorios para descartar el uso de dichos elementos químicos.

11. RECOMENDACIONES

- Realizar análisis de geoquímica inorgánica utilizando la técnica EDS en pozos cercanos y con una secuencia similar al estudiado, con el propósito de corroborar las quimiofacies aquí planteadas y su potencial de correlación estratigráfica. De esta forma se podría hablar en términos de quimioestratigrafía a través de la técnica EDS.
- Si se prueba el potencial de la EDS para esta clase de estudios, dicha técnica podría ser evaluada como proxy de control geológico durante la perforación de pozos, lo que permitiría obtener información adicional de correlación estratigráfica, sobre todo en zonas geológicamente complejas.
- Como aplicabilidad de la geoquímica inorgánica de rocas sedimentarias en la exploración de hidrocarburos, estudiar el comportamiento de los elementos químicos ante la presencia de petróleo y gas puede servir como indicador complementario al potencial de hallazgo.
- Estudiar mediante el uso de técnicas analíticas más robustas (p.ej. ICP-MS, ICP-OES), si el comportamiento de los elementos químicos se ve afectado por la presencia de hidrocarburos, lo que podría servir como indicador complementario en el hallazgo de petróleo y gas en un área.

En cuanto a la metodología de adquisición de datos se recomienda:

- Llevar la pulverización de la muestra a lo más fino posible (<50 μm), pues la abertura del haz de electrones del equipo usado para este trabajo es de 50 μm . Esto ayudará a que la muestra esté mejor homogenizada y la lectura se dé con mayor precisión sobre el total de la muestra.
- Cada vez que se vaya a generar la lectura de una muestra en el equipo, se sugiere tomar los datos de lectura de un patrón del cual se conozca sus

concentraciones elementales. Esto con el propósito de verificar que el equipo esté tomando datos acordes o ajustados.

- Los resultados comparados con el patrón permiten verificar la buena respuesta de la técnica EDS, sin embargo, es importante validar los datos arrojados con otros equipos EDS y con otras técnicas de análisis químicos elementales.
- Se recomienda trabajar en la calibración del equipo EDS y definir el grado de incertidumbre del mismo.
- Se recomienda durante la toma de datos en el equipo EDS, tener a la mano una tabla donde se resuman las bandas de aparición de los elementos en el espectro, lo que permitiría verificar la respuesta de los datos con los picos de energía visualizados en el espectro.

En caso tal de querer realizar pruebas para elementos menores, traza y REEs, se recomienda:

- Hacer el procesamiento químico de las muestras en tubos cónicos mayores a 100 ml, esto permitirá que se haga un buen lavado de los reactivos aplicados a la muestra.
- Cada vez que se vaya a lavar la muestra con agua destilada, se recomienda llevar los tubos cónicos a centrifugado, con el fin de acumular toda la muestra en el fondo del tubo y evitar pérdidas durante la evacuación del fluido.
- Para el paso de secado, se recomienda verter la muestra en cajas Petri grandes, esto con el propósito de homogenizar su secado.
- Se recomienda para la lectura de elementos menores, elegir un elemento que se haya leído en los mayores para poder tener un valor de referencia y así generar el factor que permitirá obtener el porcentaje total de los mayores y menores en la muestra. Es importante tomar siempre para todas las muestras el mismo elemento repetido en su correspondiente muestra de lectura para mayores.

- Cada vez que se realice lectura de elementos menores, trazas y REEs en una muestra diferente, se debe cerrar y abrir nuevamente el programa, indicando la configuración mencionada en la **sección 7.3.**, con el fin de que el equipo auto-identifique los elementos presentes, puesto que reconoce algunos de los 25 elegidos mientras que otros son detectados automáticamente dependiendo de la muestra.
- En las lecturas de los elementos menores es importante revisar los picos de energía detectados en el espectro y sus respectivos datos de concentraciones, ya que hay curvas de elementos que se pueden solapar y dar cuantificaciones anómalas.

BIBLIOGRAFÍA

ALFARO, Esteban; HOLZ, Michael. Review of the chronostratigraphic charts in the Sinú-San Jacinto basin based on new seismic stratigraphic interpretations. ELSEVIER. 2014. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981114001151>

ARDILA, Luis E.; DÍAZ, Leonardo; en AAPG; REPSOL; ANADARKO. Petroleum Geology and Potential of the Colombian Caribbean Margin. Memoir 108. Houston, Texas: 2015, 217 p. ISBN 13: 978-0-89181-388-0. Disponible en: <http://www.aapg.org/publications/special-publications/books/details/ArticleId/21809/petroleum-geology-and-potential-of-the-colombian-caribbean-margin>

BOGGS, Sam. Principles of sedimentology and stratigraphy. Fourth Edition. Pearson Prentice Hall. USA. 2006. ISBN 0-13-154728-3. Disponible en: https://books.google.com.co/books/about/Principles_of_Sedimentology_and_Stratigraphy.html?id=Kb0SAQAIAAJ&redir_esc=y

BOGGS, Sam. Principles of sedimentology and stratigraphy. Merril Publishing Company. Ohio, USA. 1987. ISBN 0-675-20487-9. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2015/03/principles-of-sedimentology-and-stratigraphy-by-sam-jr-boggs.pdf>

BOWLAND, Christopher L. Depositional history of the western Colombian Basin, Caribbean Sea, revealed by seismic stratigraphy. Austin, Texas. Geological Society of America Bulletin. 1993. Vol 105. 1321-1345 p. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article->

abstract/105/10/1321/182744/depositional-history-of-the-western-colombian?redirectedFrom=fulltext

CARACCILO, Luca; HENARES, Saturnina; VISERAS, Cesar; HOFFMANN, Stefan; RILEY, David; KLISCHIES, Ralf; PEARCE, Tim. Combined chemostratigraphy and high resolution sandstone petrography (HRSP) for enhanced fluvial siliciclastic reservoir quality assessment. Conference paper. 2015. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Luca_Caracciolo

CARMONA, Francesc. Un ejemplo de ACP paso a paso. Departament d'Estadística. 13 de enero de 2014. Disponible en: <http://www.ub.edu/stat/docencia/Mates/ejemploACP.PDF>

DAVIES, E.; RATCLIFFE, K.; MONTGOMERY, P.; POMAR, L.; ELLWOOD, B.; WRAY, D. Magnetic susceptibility (x) stratigraphy and chemostratigraphy applied to an isolated carbonate platform reef complex; Lluçmajor platform, Mallorca. SEPM Special Publication dedicated to the Deposits, Architecture and Controls of Carbonate Margin, Slope, and Basin Systems. 2013. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/07/Davies-et-al.-2013-Integrated-stratigraphy-of-isolated-carbonate-platforms-in-SEPM-Spec.pdf>

DAVIS, John C. Statistics and data analysis in geology. Editorial John Wiley & Sons, Inc. United States of America. . 2002. 487 – 488 p. ISBN 0-471-17275-8.

EINSELE, Gerhard; RICKEN, Werner; SEILACHER, Adolf. Cycles and events in stratigraphy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991, 126 – 166 p. ISBN 3-540-52784-2.

FLINCH, Joan F., Structural evolution of the Sinu-Lower Magdalena area (Northern Colombia), in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*: AAPG Memoir 79. 2003. 776–796 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

FLINCH, Joan; AMARAL, Joao; DOULCET, Alain; MOULY, Benoit; OSORIO, Claudia; PINCE, Jean Marc. Onshore-Offshore Structure of the Northern Colombia Accretionary Complex. AAPG International Conference (21-24 Septiembre: Barcelona, España). 2003, 1 p. Disponible en: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2003/intl/extend/ndx_83045.pdf.html?q=%252BtitleStrip%253A%2522onshore+offshore%2522+titleStrip%253Astructure+titleStrip%253Anorthern+titleStrip%253Acolombia+titleStrip%253Aaccretionary+titleStrip%253Acomplex

GÉLVEZ, Jaime Ricardo. Quimioestratigrafía y procedencia de la secuencia Campaniano-Paleoceno del Piedemonte y los Llanos Centrales. Informe interno ECOPETROL S.A.. Piedecuesta, Santander. 2007.

GEOKINETICS. Interpretación programa sísmico 2D. 2009. 17-18 p. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/S%C3%ADsmica%20Sin%C3%BA%20Sur%202D%202008.pdf>

GRUPO DE BIOESTRATIGRAFÍA-PALINOLOGÍA. Reporte Palinológico. Informe interno ECOPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2015.

HEATH, Julian. TAYLOR, Nick. *Energy Dispersive Spectroscopy*. Second Edition. Editorial Jhon Wiley & Sons Ltd. 2015. Disponible en: <http://www.essentialknowledgebriefings.com/downloads/energy-dispersive-spectroscopy/>

HILDRED, Gemma; RATCLIGGE, Ken; SCHMIDT, K. Application of Inorganic Whole-Rock Geochemistry to Shale Resource Plays: An Example from the Eagle Ford Shale, Texas. Northsiders Luncheon Meeting. Houston Geological Society (19 April: Houston, Texas). 2011, 31-33 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

HOWARTH, R. J. Statistics and data analysis in geochemical prospecting (Handbook of exploration geochemistry); volume 2. Elsevier. Amsterdam. 1983. ISBN 0-444-41932-2.

KANSAS GEOLOGICAL SURVEY. Zone Kluster ("ZeKe"). A depth constrained cluster analysis description. Disponible en: <http://www.kgs.ku.edu/stratigraphic/ZONATION/description.html>. Fecha de consulta: Julio 21 de 2017

MARÍN DIAZARAQUE, Juan Miguel. Tema 5: Análisis de Clúster y Multidimensional Scaling. Disponible en: halweb.uc3m.es/esp./Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema5am.pdf. Fecha de consulta: Marzo 14 de 2017.

MÁRQUEZ HERRERA, Alfredo. Crecimiento y caracterización de películas delgadas ferroeléctricas de $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ por la técnica de RF-Sputtering. Trabajo de grado (M.Sc. en Tecnología avanzada). Altamira, Tamaulipas. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. 2005. 22 – 23 p. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1265/Tesis%20Final.pdf?sequence=1>

MARTÍNEZ ORELLANA, Adolfo. Microanálisis por dispersión de energías de rayos-X (XEDS). Málaga, España. Servicio de Microscopía Electrónica, Universidad de Málaga. 2010. Disponible en: <http://www.uma.es/sme/nueva/Documentos/EDXS.pdf>

MARTÍNEZ, Rosa María; TUYA, Leonel C.; MARTÍNEZ, Mercedes; PÉREZ, Alberto; CÁNOVAS, Ana María. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. Caracterización. Revista ciencias médicas La Habana. 2009. Vol. 8, núm. 2. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v8n2/rhcm17209.pdf>

MELGAREJO, Joan Carles; PROENZA, Joaquín A.; GALÍ, Salvador; LLOVET, Xavier. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 2010. Vol. 62, núm. 1. 1-23 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255708960_Tecnicas_de_caracterizacion_mineral_y_su_aplicacion_en_exploracion_y_explotacion_minera

MÉNDEZ, Adriana; SALAS, Maren; GUTIÉRREZ, José V.; MARTÍNEZ, Manuel. Quimioestratigrafía de la Formación Pecaya (Oligoceno), noroeste de Venezuela: proveniencia y condiciones redox. 2005, 2 p. Disponible en: <http://www.coordinv.ciens.ucv.ve/investigacion/genci/sitios/10/archivos/Q7A-013.pdf>

NAGARAJAN, Ramasamy; MADHAVARAJU, Jayagopal; NAGENDRA, Raghavendra; ARMSTRONG-ALTRIN, John; MOUTTE, Jacques. Geochemistry of Neoproterozoic shales of the Rabanpalli Formation, Bhima Basin, Northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 2007. Vol. 24, núm. 2. 150-160 p. Disponible en:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=EB15D45A110837B68CFE747B3FAB7BA9?doi=10.1.1.518.484&rep=rep1&type=pdf>

NARANJO, Julián; GÓMEZ, Pedro; GÉLVEZ, Jaime; DUQUE, N.; MORENO, N. Methodology proposal for correlation studies of fluvial sediments base on petrographic and lithogeochemical analysis: example of its application on Cenozoic rock from the Lisama Formation (Middle Magdalena Valley, Colombia). CT&F – Ciencia, tecnología y futuro, 5(3). 19-46 p.

NARANJO, Julián; PARRA, Carlos; JEREZ, Edith; MEZA, Jorge. Caracterización petrográfica de muestras de Side Wall Core y cortes de perforación en el Pozo-1. Informe interno ECOPETROL S.A. Piedecuesta, Santander. 2015.

NICHOLS, Gary. Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley-Blackwell. England. 2009. 89-92 p. ISBN 978-1-4051-9379-5. Disponible en: <https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>

PACHECO MENDOZA, Jael. Caracterización de facies orgánicas de la formación Cansona, cuenca Sinú-San Jacinto a partir de muestras de afloramiento. Trabajo de grado (Pregrado en Geología). Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. 2010. Disponible en: http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001363882

PEARCE, Tim; MACLEAN, Duncan; MARTIN, John; RATCLIFFE, Ken; WRAY, David. A whole-rock geochemical approach to the recognition and correlation of “marine bands”. SEPM Special Publication N° 94. 2010, 221-238 p. ISBN 978-1-56576-199-5. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257605021_A_Whole-

Rock_Geochemical_Approach_to_the_Recognition_and_Correlation_of_Marine_Bands

Petroseis Ltda. Informe final de interpretación sísmica. Sinú-San Jacinto 2D 2005. Bogotá, Colombia. 2011. Disponible en: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION_2011_SINU_SAN_JACINTO_2D_2005.pdf

RATCLIFFE, K; WRIGHT, A.; HALLSWORTH, C.; MORTON, A.; ZAITLIN, B.; POTOCKI, D.; WRAY, D. An example of alternative correlation techniques in a low-accommodation setting, nonmarine hydrocarbon system: The (Lower Cretaceous) Mannville Basal Quartz succession of southern Alberta. AAPG Bulletin. 2004, V. 88, N° 10, 1419–1432 p. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

RATCLIFFE, Ken; MARTIN, J.; PEARCE, T.; HUGHES, A.; LAWTON, D.; WRAY, D.; BESSA, F. A regional chemostratigraphically-defined correlation framework for the Late Triassic TAG-I formation in blocks 402 and 405a, Algeria. 2006. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/249553009_A_regional_chemostratigraphically-defined_correlation_framework_for_the_late_Triassic_TAG-I_Formation_in_Blocks_402_and_405a_Algeria

RATCLIFFE, Ken; WRIGHT, A.; MONTGOMERY, P.; PALFREY, A.; VONK, A.; VERMEULEN, J.; BARRETT, M. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon Field, Offshore northwest Australia. APPEA Journal. 2010, 371-384 p. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/%E2%80%9CAplications-of-chemostratigraphy-to-the-Mungaroo-Formation-the-Gorgon-Field-Offshore-NW-Australia%E2%80%9D-Paper.pdf>

RATCLIFFLE, K.; WOODS, J.; RICE, C. Determining well-bore pathways during multilateral drilling campaigns in shale resource plays: an example using chemostratigraphy from the Horn River Formation, British Columbia, Canada. Eastern Australasian Basins Symposium IV. Brisbane, Queensland. 2012. Disponible en: https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/07/EABS4_Ratcliffe-et-al.pdf

REÁTEGUI, Katya; MARTÍNEZ, Manuel; ESTEVES, Iván; GUTIÉRREZ, Jose; MARTÍNEZ, Alejandro; MELÉNDE, Williams; URBANI, Franco. Geochemistry of the Mirador Formation (Late Eocene-Early Oligocene), southwestern Venezuela: Chemostratigraphic constraints on provenance and the influence of the sea level. *Geochemical Journal*. 2005. Vol. 39. 213-226 p. Disponible en: <https://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/3903/39030213.pdf>

RINCÓN, Daniel; RESTREPO, Sandra; BEDOYA, Giovanni; VARGAS, María Carolina; RODRÍGUEZ, Guillermo. Bioestratigrafía integrada basada en nanofósiles calcáreos, palinología y foraminíferos de rípios del Pozo-1. Soporte técnico y caracterización de reservorios para la perforación de pozos exploratorios (Pozos VEX). Informe interno ECOPETROL S.A..Piedecuesta, Santander. 2016.

ROLLINSON, Hugh. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Pearson Education Limited. England. 1993. 5-7 p. 22-23 p. ISBN-10:0-582-06701-4.

SIERRA, Jair; GÓMEZ, Pedro. Revisión de información estratigráfica y determinación del marco cronoestratigráfico para dos sectores en el norte de Colombia: Área de los cinturones plegados de Sinú y San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena. Modelamiento Geológico de Áreas Costa Afuera para la Disminución de Incertidumbre Exploratoria. Informe interno ECOPETROL S.A.. Piedecuesta, Santander. 2010.

SPRAGUE, Ronald; MELVIN, John; CONRADI, Florian; PEARCE, Tim; DIX, Mike; HILL, Steve; CANHAM, Andrew. Integration of Core-based Chemostratigraphy and Petrography of the Devonian Jauf Sandstones, Uthmaniya Area, Ghawar Field, Eastern Saudi Arabia. Adapted from oral presentation AAPG Convention (20-23 April: San Antonio, Texas). 2008. Disponible en: <http://archives.datapages.com/data/index.html>

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Laboratorio de Rayos X. Informe de resultados difracción de Rayos-X. (Anexo A).

WRIGHT, Amelia; RATCLIFFE, Ken. The chemostratigraphic typing of the Nanushuk and Tuluvak Formations (Cretaceous), Colville Basin, Northern Alaska. 2004. Disponible en: <http://www.geoconvention.com/archives/2004/225S0208.pdf>

WRIGHT, Amelia; RATCLIFFE, Ken; ZAITLIN, Brian; WRAY, Davies. The application of chemostratigraphic techniques to distinguish compound incised valleys in low-accommodation incised-valley systems in a foreland-basin setting: an example from the lower cretaceous Mannville Group and Basal Colorado Sandstone (Colorado Group), Western Canadian sedimentary basin. SEPM Special Publication N° 94. 2010. Disponible en: <https://www.chemostrat.com/wp-content/uploads/2013/08/The-Application-of-Chemostratigraphic-Techniques-to-Distinguish-Compound-Incised-Valleys-in-Low-Accommodation-Incised-Valley-Systems-in-a-Foreland-Basin-Setting-an-Example-from-the-Lower-Cretaceous-Mannville-Group.pdf>

ANEXOS