

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA
INSTITUTO DE INGENIERÍA PETROLERA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RESERVORIOS: EXPLORACIÓN,
EVALUACIÓN Y MEDIO AMBIENTE – SEGUNDA VERSIÓN



TESIS DE MAESTRÍA

**“CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA, MINERALÓGICO Y DE
PROVENIENCIA DE ARENISCAS DE LA FORMACIÓN
PETACA, POZO HUMBERTO SUAREZ ROCA DIRIGIDO HSR-
X12 D”**

POSTULANTES:

ING. MILTON JESUS ALBERTO CUENTAS

ING. MILTON RODRIGO YUJRA HUANCA

TUTOR:

Msc Ing. SHIRLEY SUSANA LÓPEZ VELÁSQUEZ

LA PAZ – BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Dedicamos la presente tesis de maestría a nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad, muchos de nuestros logros se los debemos a ellos. Nos formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos.

AGRADECIMIENTOS

En la presente tesis de maestría, se requirió del esfuerzo y dedicación por parte de los autores, pero no se habría culminado sin la colaboración de nuestra tutora Msc. Ing. Shirley Susana López Velásquez y del docente PhD Udo Zimmermann que de manera desinteresada nos han expresado su apoyo moral para la continuidad de este emprendimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE DE CONTENIDO..... I

ÍNDICE DE FIGURAS IV

ÍNDICE DE TABLAS..... VI

ÍNDICE DE ANEXOS VII

RESUMEN IX

SUMMARY X

1. MARCO GENERAL 1

1.1. Introducción 1

1.2. Justificación del Tema 2

1.3. Problema 2

1.3.1. Fundamentación del Problema..... 2

1.3.2. Identificación del Problema..... 3

1.3.3. Análisis del Problema 3

1.4. Hipótesis 4

1.5. Objetivos 4

1.5.1. Objetivo General 4

1.5.2. Objetivos Específicos..... 4

1.6.	Metodología	5
1.6.1.	Tipo de Investigación.....	5
1.6.2.	Tipo de Metodología.....	5
1.6.3.	Técnica de Investigación.....	5
1.7.	Alcances.....	6
1.7.1.	Alcance Sectorial.....	6
1.7.2.	Alcance Geográfico	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Aspectos Teóricos Conceptuales	7
2.1.1.	Petrofísica	7
2.1.2.	Mineralogía	7
2.1.3.	Equipos de Laboratorio Utilizados Para el Estudio	8
2.2.	Aspecto Histórico	10
2.2.1.	Antecedentes del Campo Humberto Suarez Roca	10
3.	MARCO PRÁCTICO	13
3.1.	Universo y Muestra.....	13
3.1.1.	Universo.....	13
3.1.2.	Muestra	13
3.1.3.	Tamaño de la Muestra	13
3.1.4.	Trabajo de Campo	14

3.1.5.	Secuencia Estratigráfica	15
3.2.	Introducción a la Petrografía	18
3.3.	Preparación de Láminas Delgadas	18
3.3.1.	Lijado de Porta Objetos	20
3.3.2.	Corte de las Muestras	21
3.3.3.	Pegado de la Muestra al Porta Objetos	21
3.3.4.	Pulido de las Muestras	24
3.4.	Observación para el Análisis Petrográfico de las Muestras	26
3.5.	Resultados petrografía	27
3.6.	Geoquímica	32
3.6.1.	Metodología de Análisis Geoquímico	32
3.6.2.	Análisis de Datos de Geoquímica	34
4.	CONCLUSIONES	47
5.	BIBLIOGRAFÍA	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa general de ubicación	10
Figura 2.2 Constitución de la Fm Petaca en roca reservorio.	12
Figura 3.3 Derrame de testigos	14
Figura 3.4 Estructura de la zona Subandina y Chaco	17
Figura 3.5 Muestra cortada en máquina cortadora de rocas	19
Figura 3.6 Izquierda, porta objetos previo al desgaste, derecha, posterior al desgastado con la Slicing – Grinding – Lapping Machine SGL 200	20
Figura 3.7 Corte de muestra en máquina cortadora marca Vinci, modelo CS-200.....	21
Figura 3.8 Resina Epoxi izq. y agente de secado Der. marca Araldite	22
Figura 3.9 Proceso de limpieza de la muestra en preparación en el equipo de ultrasonido marca Ulsonix, modelo Proclean 2.0 DS.....	23
Figura 3.10 Máquina de secado al vacío marca Vinci VEU	23
Figura 3.11 Máquina de secado Magefesa	24
Figura 3.12 Polvo de carbonato de silicio # 800 para el desgastado de las muestras	25
Figura 3.13 Muestras en proceso de desgastado, preparadas en laboratorio	25
Figura 3.14 Muestras desgastadas listas y etiquetadas para su observación.....	26
Figura 3.15 Observación de las muestras en el microscopio.....	26
Figura 3.16 Muestra 1.....	27
Figura 3.17 Muestra 2.....	28
Figura 3.18 Muestra 3.....	29
Figura 3.19 Muestra 4.....	30
Figura 3.20 Muestra 5.....	31

Figura 3.21 Muestra 6.....	32
Figura 3.22 Ejemplo de lectura de un XRD de las diferentes fases de una muestra.	34
Figura 3.23 Diagrama $Al_2O_3 - (CaO+Na_2O) - K_2O$	39
Figura 3.24 Diagrama ternario	40
Figura 3.25 Diagrama de clasificación química de rocas según Pettijohn, (1963)	41
Figura 3.26 Diagrama binario de McLennan, 1993.....	43
Figura 3.27 Diagrama Nb/Y vs Zr/Ti.....	44
Figura 3.28 Diagrama Zr/Sc vs. Th/Sc.....	45
Figura 3.29 Diagrama La/Sc vs Ti/Zr de Bathia et al, 1986 en Zimmermann and Spalletti, 2009.	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Elementos mayoritarios.....	36
Tabla 3. 2 Elementos minoritarios	42

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Tabla A1 Porcentaje Composicional Mineralógico.....	51
Anexo 2 Tabla A2 Cálculo del Chemical Index of Alteration (CIA)	52
Anexo 3 Tabla A3 Cálculo de las relaciones Nb/Y vs Zr/Ti, Zr/Sc vs Th/Sc y La/Sc vs Ti/Zr ...	53

ACRÓNIMOS

HSR	Humberto Suarez Roca
MD	Measure Depth (Profundidad medida)
CIA	Chemical Index of Alteration (Índice de Alteración Química)
Y.P.F.B.	Yacimientos Petrolíferos Fiscales de Bolivia
INSPET	Instituto de Investigaciones Petroleras
FM	Formación
LCD	Liquid-Crystal Display (Pantalla de Cristal Líquido)
DRX	Difracción de Rayos X
SGL	Slicing-Grinding-Lapping (Maquina cortadora, rectificadora y lapeadora)
Zt	Profundidad a la Cima
TVD	True Vertical Depth (Profundidad Vertical Verdadera)
U.M.S.A.	Universidad Mayor de San Andrés
hs	Horas
mm	Milímetros
Fsp	Feldespatos
Qzv	Cuarzo volcánico
Ort	Ortosa
Lit	Litio
Qz	Cuarzo
REE	Rare Earth Elements (Elementos Trazas y Tierras Raras)
UCC	Upper Continental Crust

RESUMEN

El presente trabajo ha sido desarrollado con el objetivo de contribuir al conocimiento de las características petrográficas, mineralógicas y de procedencia de la Fm Petaca a partir de una muestra proveniente del pozo Humberto Suarez Roca HRS X12 D de 1220 m (MD). La muestra proviene del nivel arenoso de la Fm Petaca fue atravesada a los 886,10 m (MD) y tiene un espesor de 63,4 m, suprayace a la Fm Cajones del Cretácico y delimita por el tope con la Fm Yecua del Cenozoico. Se trata de una arenisca cuarzosa subfeldespática, con una porosidad de 13,4 %. Posteriormente se realizó el análisis de la muestra Fm con los equipos de laboratorio de la carrera de Ingeniería Petrolera en la que se observó la composición petrográfica consta de arenisca de grano medio a fino, subangulares y mal seleccionados, con matriz limolítica. Empaquetamiento pobre donde se observa muy poco contacto entre los granos. La composición mineralógica constó de cuarzo volcánico, con recristalización en los bordes y feldespato del tipo potásico como ortoclasa, algunos casos con feldespato peritítico, y clastos líticos. Los análisis geoquímicos sugerían una composición *arenisca ferromagnesiano* según el diagrama ternario $Al_2O_3 + Fe_2O_3 - Na_2O_3 - K_2O_3$. De acuerdo a la relación $\text{Log} (Fe_2O_3/K_2O_3)$ vs $\text{Log} (SiO_2 / Al_2O_3)$ clasifica como *Subarcosa*.

El índice de alteración (CIA) indica ser una roca inalterada, con tendencia a composición riolítica, y su roca madre de procedencia sugiere *Margen Continental Activo*. Finalmente, los datos que fueron ploteados mostraron diferentes composiciones y concentraciones de La, Ti, Zr y Sc que presenta la muestra, el ambiente sugerido a partir de los resultados obtenidos para la muestra de la formación Petaca es de margen continental activo.

SUMMARY

The present work has been developed with the objective of contributing to the knowledge of the petrographic, mineralogical and provenance characteristics of the Petaca Formation, from the Humberto Suarez Roca HRS-X12 D 1220 m (MD) well sample. The sample comes from the sandy level of the Petaca Formation, it was crossed at 886.10 m (MD) and has a thickness of 63.4 m, it overlies the Cretaceous Cajones Formation and delimits at the top with the Cenozoic Yecua Formation. It is a subfeldspathic quartz sandstone, with a porosity of 13.4%. The petrographic composition consists of sandstone of medium to fine grain, subangular and poorly selected, with a silt matrix. Poor packing with very little contact between the grains is observed. The mineralogical composition consists of volcanic quartz, with recrystallization at the edges and potassium-type feldspar as orthoclase, some cases with peritic feldspar, and lithic clasts. Geochemical analyzes suggest a ferromagnesian sandstone composition according to the ternary diagram $Al_2O_3 + Fe_2O_3 - Na_2O_3 - K_2O_3$. According to the relationship $\text{Log}(Fe_2O_3 / K_2O_3)$ vs $\text{Log}(SiO_2 / Al_2O_3)$ classifies as Subarcosa.

The alteration index (CIA) indicates that it is an unaltered rock, with a tendency to rhyolitic composition, and its source rock suggests Active Continental Margin. Finally, the data that were plotted showed different compositions and concentrations of La, Ti, Zr and Sc that the sample presents, the environment suggested from the results obtained for the sample of the Petaca formation is of active continental margin.

CAPÍTULO I

MARCO GENERAL

1.1. Introducción

La muestra objeto de estudio es proveniente de la formación Petaca del Pozo Humberto Suarez Dirigido (HSR-X12 D), el cual es operado por la compañía YPFB CHACO¹. Dicho pozo HSR-X12 D se encuentra ubicado en el Campo Humberto Suarez Roca, en la Provincia Sara del Departamento de Santa Cruz.

La columna estratigráfica del pozo HSR-X12 D, presenta manifestación de gas en rocas de edad Terciaria y Cretácica. Para el análisis petrográfico en laboratorio se obtuvo una muestra (testigo), perteneciente a la formación Petaca. La petrografía microscópica permite identificar la composición mineralógica y el origen de estos, a partir del análisis de la muestra el cual será detallado más adelante.

El estudio geoquímico, permite conocer, además de la composición química de la roca o de alguna fase del mineral en particular, el ambiente de rocas de procedencia. La muestra para el presente estudio fue obtenida mediante un derrame ocasionado por la presencia de gas durante la perforación del pozo HSR-X12 D, esta muestra proveniente de la Formación Petaca fue corroborada mediante el registro eléctrico LWD desarrollado por la empresa Geolog Surface Logging.

¹ YPFB Chaco S.A., subsidiaria de YPFB Corporación, es una empresa comprometida con el desarrollo energético de Bolivia, para lo cual tiene como actividades principales: La exploración y producción de hidrocarburos.

1.2. Justificación del Tema

La justificación para el desarrollo del presente estudio, es principalmente contribuir al conocimiento del campo hidrocarburífero que en este momento se constituye una urgencia en el ámbito energético para el país.

La Fm Petaca tiene importancia porque es roca productora en las cuencas de Subandino, Llanura Chaqueña y Boumerang. Su comprensión desde el punto de vista petrográfico y geoquímico permitirá correlacionar los resultados a nuevas áreas de interés exploratorio para hidrocarburos.

No existen estudios publicados referidos a estos parámetros físicos y geoquímicos de la Fm Petaca, ni de superficie ni de pozo.

Estos parámetros son determinantes para cualquier roca reservorio, puesto que al comprenderlos son aplicables a los trabajos de valoración de un reservorio y a los trabajos de exploración de recursos hidrocarburíferos principalmente de gas.

La oportunidad de disponer de una muestra de roca proveniente del pozo HSR-X12 D de la Fm Petaca, para caracterizar esta roca, mediante el estudio petrofísico y mineralógico desarrollado en laboratorio de la Carrera (INSPET²).

1.3. Problema

1.3.1. *Fundamentación del Problema*

La carencia de datos petrográficos y geoquímicos no ha permitido entender por completo el comportamiento de la Fm Petaca en relación a sus características como roca reservorio³. Esta unidad formacional es productora en los Campos de Arroyo Negro, Colpa, Junín, Kanata, Los

² Instituto de Investigaciones Petroleras (INSPET). Fundado el 2 octubre, 2013. Entidad Dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés.

³ Una buena roca reservorio actúa como una esponja, reteniendo una gran cantidad de petróleo y gas en un área limitada. También produce petróleo y gas con un menor esfuerzo que el requerido que el obtenerlo de una roca madre. La roca reservorio forma parte del sistema de hidrocarburos.

Cusís, Los Penocos, Paloma, Patujusal, Puerto Palos, Río Grande, Sirarí, Surubí, Tajibo, Víbora, y Humberto Suarez Roca ver Figura 2.1.

Por otro lado, la gentileza para el patrocinio de los análisis geoquímicos, de parte de la Cooperación Noruega, ya que estos se realizaron en la Universidad de Stavanga⁴.

1.3.2. Identificación del Problema

La Fm Petaca carece de estudios geoquímicos y mineralógicos que contribuyan a la comprensión completa de su desenvolvimiento como roca reservorio. Para ello se requiere conocer cómo afectó el proceso diagenético, el índice de alteración, así como la procedencia del sedimento. El entendimiento de estos parámetros nos permite definir a la roca y a los procesos que afectaron su capacidad de roca reservorio, de tal manera que permitan correlacionar a otros afloramientos de esta unidad formacional.

1.3.3. Análisis del Problema

La condición de roca reservorio de varios campos productores induce a conocer en profundidad las características petrográficas mineralógicas y geoquímicas. La petrografía es una ciencia de la geología para la definición de sus componentes litológicos que son determinantes para conocer su porosidad y a partir de ello caracterizar su condición de reservorio. La composición mineral, por otro lado, sugiere conocer cuán estables son sus componentes para conservar su porosidad primaria o si es susceptible a perderla en otras condiciones ambientales. Finalmente, la geoquímica proporciona información de la roca madre⁵ de los sedimentos según el contexto geológico del que proviene.

⁴ <https://www.uis.no/frontpage/#Studies>.

⁵ Para formar petróleo y gas, necesitas una capa de roca sedimentaria rica en materia orgánica conocida como Roca madre de hidrocarburo.

La Fm Petaca es la base del Sistema Cenozoico⁶ que cambia a un sistema deposicional de ambiente fluvial y de espesor variable de hasta 200 m.

1.4. Hipótesis

Las areniscas de la Fm Petaca fueron depositadas en un ambiente fluvial corresponden a areniscas bien seleccionadas y poco compactas predominantemente cuarzosas, con un bajo índice de alteración y su ambiente de procedencia corresponde a un margen continental activo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Caracterizar las propiedades petrofísicas, mineralógicas y de proveniencia de las areniscas de la Fm Petaca para el Pozo HSR-X12 D y contribuir al conocimiento de sus propiedades de roca reservorio del Subandino sur.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades petrofísicas de la Fm Petaca a partir de láminas delgadas de muestras del pozo HSR-X12 D.
- Determinar la composición petrográfica y mineralógica de la Fm Petaca a partir de láminas delgadas de roca y conocer sus características de roca reservorio.
- Determinar las propiedades geoquímicas de la roca madre de los sedimentos de la Fm Petaca.

⁶ La Era Cenozoica o Cenozoico (antiguamente también Era Terciaria), una división de la escala temporal geológica, es la era geológica que se inició hace unos 66.0 millones de años y que se extiende hasta la actualidad. Es la tercera y última era del Eón Fanerozoico y sigue a la Era Mesozoica (IUGS, 2018).

1.6. Metodología

1.6.1. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo *descriptiva*⁷, ya que tiene como principal objetivo analizar la petrografía y mineralogía de la muestra objeto de estudio, proveniente de la Fm Petaca del pozo HSR-X12 D, con los equipos de laboratorio de la carrera de Ingeniería Petrolera.

1.6.2. Tipo de Metodología

La metodología de trabajo aplicada en el presente estudio fueron tres, detalladas a continuación:

1. Metodología de Campo. - Para la recolección de datos del terreno y de muestra de roca.
2. Metodología de Laboratorio. - Se divide en dos partes:
 - Preparación de láminas delgadas⁸ de roca (thin section) y determinaciones petrográficas y mineralógicas al microscopio.
 - Análisis geoquímico por XRD⁹ (Difractometría de rayos X).
3. Metodología de Gabinete. - Se divide en dos partes:
 - Sistematización de los datos obtenidos en el trabajo de campo.
 - Análisis e interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio y pruebas de campo realizadas.

1.6.3. Técnica de Investigación

Los tipos de técnicas de investigación empleadas en el presente estudio fueron: observación de campo y laboratorio, y recopilación y análisis de datos, a partir de muestras obtenidas en el terreno.

⁷ Esta estrategia de investigación es la que describe, analiza, compara y evalúa los hechos y fenómenos que son objeto de investigación dentro de una unidad o sujeto de investigación. Se caracteriza porque describe, no sugiere esquemas o modelos de cambio (Arandía L., 2013).

⁸ Las láminas delgadas o secciones delgadas.

⁹ El difractómetro de rayos X es el instrumento que permite la identificación de las estructuras cristalinas, fundamentado en la difracción según Bragg.

Para la preparación de láminas delgadas se procedió con el método tradicional de corte, pulido y desgastado de la roca. Para análisis geoquímico se realizó por el método de XRD (X Ray Diffractometer). En gabinete, se aplicó el método de observación al microscopio de luz transmitida.

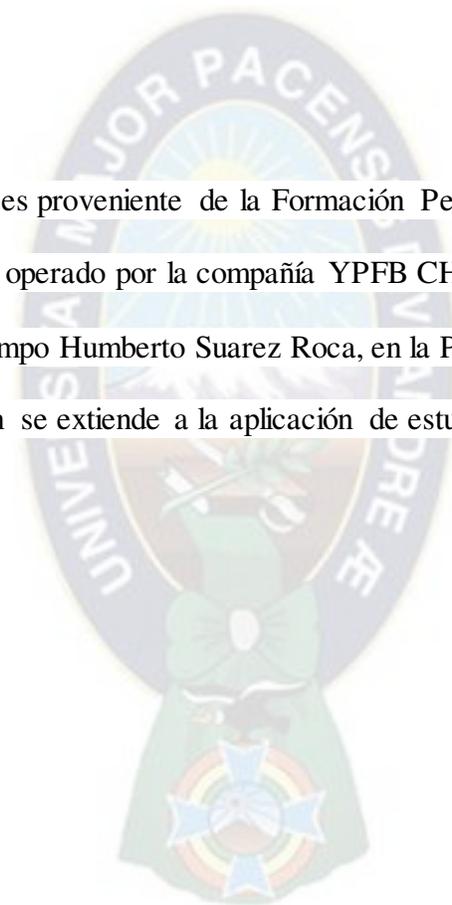
1.7. Alcances

1.7.1. Alcance Sectorial

La investigación tiene un alcance sectorial en el ámbito académico, hidrocarburífero y geológico principalmente.

1.7.2. Alcance Geográfico

La muestra objeto de estudio es proveniente de la Formación Petaca del Pozo Humberto Suarez Roca X12 Dirigido, el cual es operado por la compañía YPFB CHACO. Dicho pozo HSR-X12 D se encuentra ubicado en el Campo Humberto Suarez Roca, en la Provincia Sara del Departamento de Santa Cruz. La información se extiende a la aplicación de estudios de la Fm Petaca de la Faja Subandina Sur.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aspectos Teóricos Conceptuales

2.1.1. *Petrofísica*

La petrofísica, se encarga de la caracterización de las propiedades físicas y texturales de las rocas, especialmente la distribución de los poros, que sirven como depósitos para las acumulaciones de hidrocarburos, y que permiten considerarlas como posibles prospectos para la explotación. También caracteriza los fluidos contenidos en ellas, mediante la integración del entorno geológico, perfiles de pozos, análisis de muestras de roca y sus fluidos e historias de producción. Mediante la caracterización petrofísica de un yacimiento, se busca calcular con mayor precisión las reservas de hidrocarburos para evaluar la factibilidad económica de un proyecto (Uribe R., 2012).

En cuanto a los parámetros necesarios para llevar a cabo dicha evaluación se encuentran la porosidad, la permeabilidad, la saturación de fluidos (agua e hidrocarburos \pm petróleo y/o gas), el volumen de arcillosidad, el espesor del yacimiento y su área, la mineralogía de la formación, la movilidad del petróleo y la distribución del tamaño de los granos.

2.1.2. *Mineralogía*

La mineralogía es una ciencia de la Geología que estudia a los minerales, su comportamiento y su interacción con otros elementos naturales, su ubicación terrestre y subterránea; en otras palabras, todo lo relativo a este tipo de elementos. Debido a que gran parte de los minerales se encuentran bajo o dentro de la tierra, la mineralogía forma parte de una ciencia mayor que es la geología y que estudia los diferentes estratos del planeta tierra. La mineralogía es una ciencia

de vital importancia no sólo para llevar a cabo actividades productivas que impliquen la extracción de minerales, sino también para conocer los diferentes tipos de terrenos, su peligrosidad, etc. (Castro A., 2011).

2.1.3. Equipos de Laboratorio Utilizados Para el Estudio

2.1.3.1. Láminas Delgadas

Las láminas delgadas son preparaciones que se realizan en rocas para su estudio con microscopio petrográfico, y que consisten en rodajas de la roca de un espesor de unas 30 μm que se adhieren a láminas de vidrio mediante resina epoxi, para posteriormente ser recubiertas con un cubre objetos. El objetivo de preparar una lámina delgada dejándola a 30 μm es para permitir que la luz la atraviese.

2.1.3.2. Máquina Cortadora de Rocas

Es un equipo constituido de discos de corte cuya función es seccionar las muestras para su respectivo análisis.

2.1.3.3. Microscopio de Luz Transmitida

Se compone de un microscopio óptico, una cámara y una pantalla LSD con el cual se puede visualizar de forma clara piezas diminutas, lo que lo convierte en un instrumento muy apto para laboratorio. El microscopio petrográfico posee un polarizador que convierte la luz que emite en luz polarizada, un analizador, que es una lente que polariza la luz perpendicularmente al polarizador. Las observaciones se pueden realizar con el analizador activado o sin él. Cuando se observa una lámina delgada al microscopio la luz atraviesa el polarizador y una vez polarizada atraviesa la lámina delgada y llega al analizador (si está activado) y luego al observador. A partir de la observación, con y sin analizador, de las distintas propiedades de los minerales en láminas delgadas, se puede conseguir su identificación. (Garrels & MacKenzie, 1971).

2.1.3.4. Máquina de Secado

Está diseñado para aplicaciones de calentamiento, secado y esterilización en entornos de investigación, clínicos o industriales. El horno de laboratorio es ideal para aplicaciones de: laboratorios de suelos, secado de muestras, esterilización y secado de material.

2.1.3.5. Máquina de Vacío

En el secado al vacío se requieren temperaturas más bajas que las utilizadas por los hornos de secado convencionales. En el vacío, la humedad se evapora por debajo del punto de ebullición habitual del líquido que se necesita eliminar, lo que da lugar a un proceso de secado más suave para las muestras delicadas.

2.1.3.6. Máquina de Ultrasónico

Especialmente indicado para instrumental y material de laboratorio de vidrio, plástico o metal. Las máquinas de limpieza por ultrasonidos se utilizan en los laboratorios para eliminar restos de productos químicos, aceites, pigmentos o huellas, entre otros residuos.

2.1.3.7. Slicing-Grinding-Lapping Maching

La SGL200 puede cortar, rectificar y lapear especímenes en el mismo instrumento. Un disco lapeador de acero de alto grado, sierra de corte adiamantada, una rueda rectificadora y un porta muestras versátil al vacío para diferentes tamaños de láminas son los elementos claves de esta máquina multifacética. La muestra se transfiere directamente desde la sierra cortadora a la rueda rectificadora, de tal modo que la rueda gire manualmente, facilitando de este modo el procedimiento y ahorrando tiempo. Un tornillo ajustable controla el espesor de corte mientras que el micrómetro monitorea la precisión del espesor rectificado de la lámina delgada. El lapeado de la muestra consiste en sostenerla manualmente mientras la solución de carburo de silicio se vierte periódicamente sobre el disco.

2.1.3.8. Difractometría de Rayos X

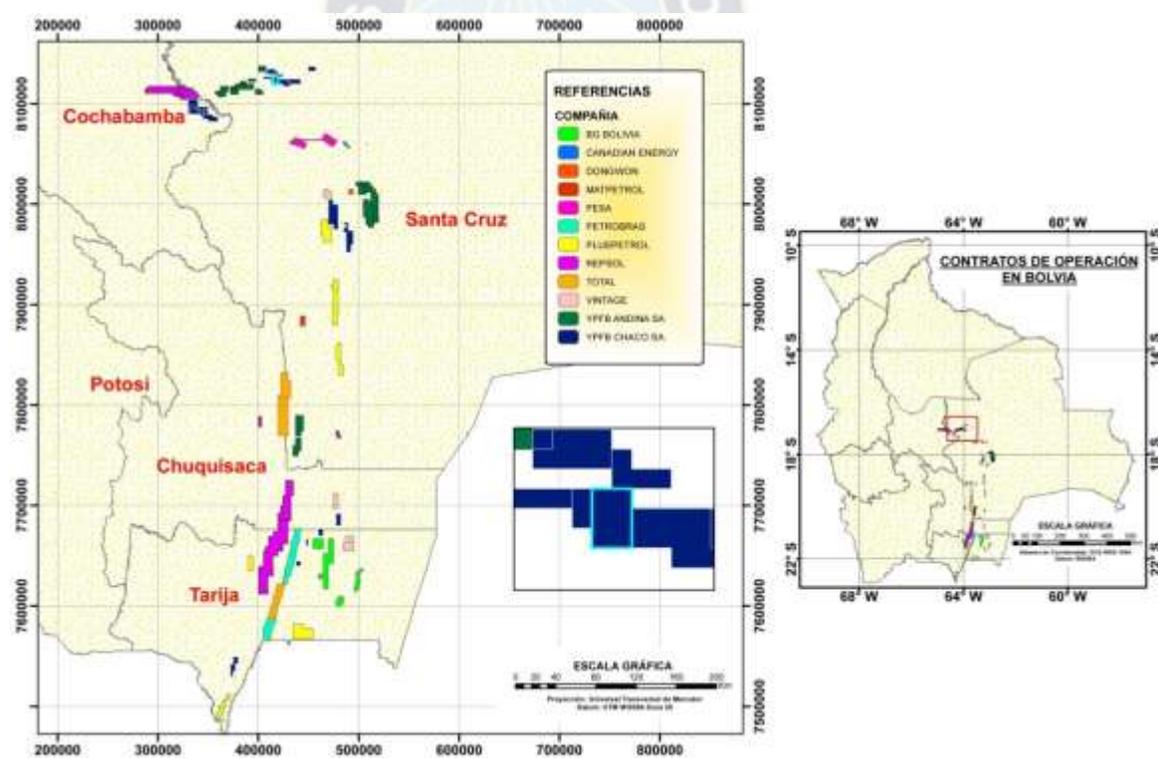
El difractómetro es un instrumento utilizado para medir la difracción de un haz de radiación incidente sobre una muestra de un material. La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético.

2.2. Aspecto Histórico

2.2.1. Antecedentes del Campo Humberto Suarez Roca

Figura 2.1

Mapa general de ubicación



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos.

El Campo Humberto Suarez Roca está ubicado en la Provincia Sara del Departamento de Santa Cruz, y junto a los Campos Santa Rosa Oeste, Junín, Junín Este, Santa Rosa y Palometas NW, forma parte de un conjunto de estructuras denominado Complejo Santa Rosa ver figura 2.1.

Las campañas de perforación del complejo Santa Rosa comenzaron con el pozo SRS X-1, en la estructura del mismo nombre, el año 1972 con resultados positivos, lo cual estimuló la continuidad exploratoria en el prospecto¹⁰. Años posteriores se perforaron.

El Campo Humberto Suarez Roca fue definido en base a la estructura del mismo nombre, actualmente operada por la empresa Chaco, el pozo descubridor HSR X-1 fue perforado el año 1982, con una profundidad Zt¹¹ de 252 m, con resultado positivo para líquido. En el Campo Humberto Suarez Roca, se perforaron una totalidad de 10 pozos de los cuales los pozos HSR-3, HSR-7 y HSR-9 se clasificaron como improductivos.

Durante la perforación de los 10 pozos la empresa YPFB, puso inicialmente todo su interés en los reservorios profundos, obteniendo en la mayoría solo registros de correlación para los reservorios someros del complejo Santa Rosa "Formaciones Petaca, Cajones y Yantata". Este procedimiento de trabajo derivó una carencia de información para los reservorios someros comprendidos entre las edades geocronológicas del Cretácico-Terciario del Campo Humberto Suarez Roca y de los vecinos.

La perforación del pozo HSR-X12 D fue orientado a la investigación de arenas someras como la Fm Petaca. De acuerdo a estudio publicado por Vergani et al, (2012), su porosidad y permeabilidad es variable, teniendo en el caso de una muestra de superficie medida 13.8 % de porosidad y 7.47 mD de permeabilidad.

¹⁰ Es un lugar específico bajo la superficie donde el petróleo o el gas podría ser encontrado.

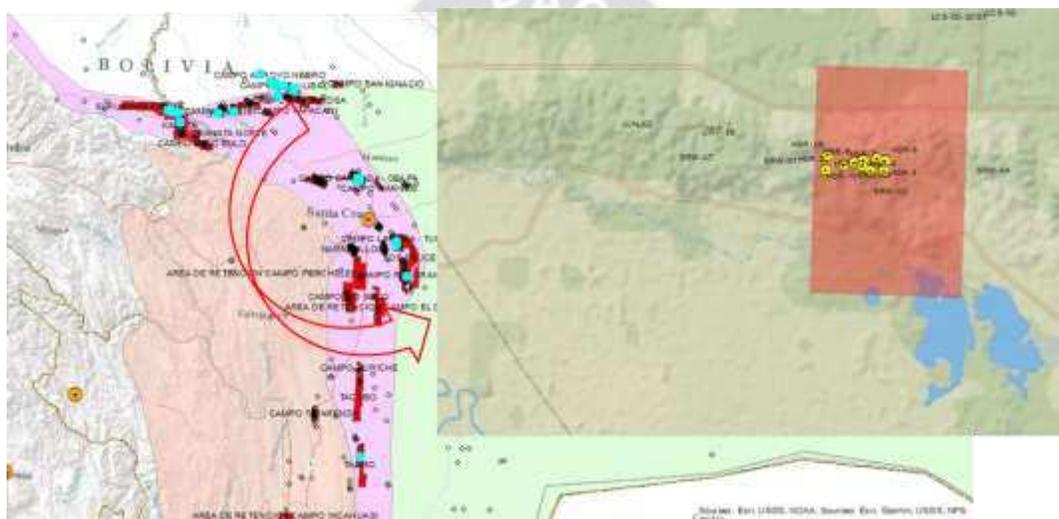
¹¹ Zt es la profundidad a la cima.

Actualmente la Fm Petaca es productora de gas en aproximadamente 15 campos. El siguiente mapa muestra aquellos campos que producen de las areniscas de esta unidad formacional.

Figura 2.2

Constitución de la Fm Petaca en roca reservorio.

A la derecha, una ampliación del Campo Humberto Suarez Roca, en amarillo los pozos perforados



Fuente: Elaboración Propia.

Representación de los campos productores del país en rojo y en celeste, aquellos donde la Fm Petaca se constituye en roca reservorio. Flecha roja, el Campo Humberto Suarez Roca ver figura 2.2.

CAPÍTULO III

MARCO PRÁCTICO

3.1. Universo y Muestra

3.1.1. Universo

El Campo Humberto Suarez Roca que se encuentra ubicado en la Provincia Sara del Departamento de Santa Cruz, y junto a los Campos Santa Rosa Oeste, Junín, Junín Este, Santa Rosa y Palometas NW, forma parte de un conjunto de estructuras denominado Complejo Santa Rosa.

3.1.2. Muestra

La caracterización petrofísica y mineralógica de la muestra objeto del presente estudio se determinó gracias a la obtención de una porción de areniscas provenientes del pozo HSR-X12 D, durante su perforación del mismo. En vista que se registró a la Fm Petaca en el mencionado pozo y de que no había sido considerada como objetivo exploratorio hasta ese momento, nos planteamos como un objetivo de estudio de tal manera que se constituyan en una base para futuros trabajos exploratorios. Algunos campos vecinos tienen como arenas productoras dentro de la Fm Petaca,

3.1.3. Tamaño de la Muestra

En el presente estudio se pretende observar detenidamente la muestra objeto de estudio con el uso de los equipos de laboratorio para determinar detalladamente las características Petrofísicas y Mineralógicas de la muestra de la Fm Petaca proveniente del Pozo HSR-X12 D. Se trabajó con una muestra de 1 Kg, de la cual se elaboraron 3 láminas delgadas y el análisis geoquímico con 50 gramos. El espesor promedio de la Fm Petaca en la zona es de 199 m y las arenas tienen un espesor

de 3 m (Gerencia de desarrollo, 2017. Informe propuesta geológica de perforación pozo HSR-X12 D).

3.1.4. Trabajo de Campo

El proyecto HSR-X12 D es un pozo dirigido de aproximadamente 1220.00 m MD y 1128.50 m TVD cuyo objetivo principal es verificar la existencia de hidrocarburos en la Formación Petaca y como objetivos secundarios las Formaciones Cajones y Yantata. En lo que se refiere a las presiones de reservorio, se estimó encontrar a la Formación Petaca con 1540.2 psi, Cajones con 1546.8 psi y Yantata con 1551.1 psi. tal como se muestra en la siguiente figura 3.3:

Figura 3.3

Derrame de testigos



Fuente: Geolog Surface Logging.

La temperatura según datos pozos offsets tiene un gradiente $1.4\text{ }^{\circ}\text{F}/100\text{ ft}$, con este gradiente¹², se esperó alcanzar una temperatura máxima de $131.67\text{ }^{\circ}\text{F}$ en fondo de pozo (Aponte C. 2017. Informe Programa Perforación & Completación HSR-X12 D). En base a informes mencionados, las muestras obtenidas durante la etapa de perforación de la Formación Petaca se las recolectó durante un rebalse de estas en superficie, en fecha 28 de junio de 2017 por la empresa Geolog Surface Logging durante el coroneo del intervalo Tope 929 – Base 935 m proveniente del pozo exploratorio Humberto Suarez Roca X12 Dirigido.

3.1.5. Secuencia Estratigráfica

La secuencia estratigráfica atravesada en la perforación del pozo HSR-X12 D, tuvo como objetivo a la Fm Petaca con una profundidad de fondo pozo de 1220.00 m (MD) y 1128.50 m (TVD), con una secuencia estratigráfica constituida por rocas de edad Terciaria y Cretácica-Jurásica, dominada por litología de areniscas friables y bancos de pelitas *solubles*. La litología registrada durante la perforación es la siguiente:

3.1.5.1. Sistema terciario

- **Formación Tariquía**

Registrada a 0 m (MD) y 0 m (TVD), compuesta por intercalaciones de areniscas blanquecinas, marrón rojizas, marrón rojizo claro, marrón amarillento. En los recortes se observan las areniscas marrones claro, grano suelto de cuarzo hialino, translucido, escaso opaco y ámbar, grano medio, escaso grueso, sub-redondeado, sub-angular, buena a mala selección. Las arcillitas presentan una coloración marrón rojizo clara, en parte amorfa, masiva, plástica, soluble, blanda.

¹² El gradiente geográficamente puede cambiar de una zona a otra, inclusive puede hacerlo lateralmente dentro de la misma unidad estratigráfica las mediciones de la temperatura se las realiza utilizando un sensor de temperatura que baja el pozo en perforación cuando este se encuentra en equilibrio térmico.

- **Formación Yecua**

Registrada a 554.20 m (MD) y 533.80 m (TVD), la Formación Yecua es predominantemente pelítica, está compuesta de arcillitas marrón claro, marrón oscuro rojizo, con ligeras intercalaciones de areniscas hacia la base.

Las arcillitas presentan una coloración marrón, marrón rojiza en el tope, hacia la base se observa un cambio en la coloración de éstas a gris verdoso, con intercalaciones de areniscas gris claro, gris verdoso claro de grano muy fino.

- **Formación Petaca**

Registrada a 886.10 m (MD) y 830.00 m (TVD), la Formación Petaca está compuesta por areniscas de coloración gris claro, gris verdoso, grano fino a muy fino, regular selección, matriz arcillosa, leve cemento silíceo. Hacia la base se observan arcillitas de coloración marrón claro, amorfa, blanda, solubles.

3.1.5.2. Sistema Cretácico -Jurásico

- **Formación Cajones**

Registrada a 953.90 m (MD) y 890.50 m (TVD), la Formación Cajones presenta en su tope areniscas de coloración gris claro, friable, grano fino a medio, sub-redondeado, sub-angular, buena selección, matriz limo-arcilloso, escaso cemento calcáreo. Hacia la base se encuentran niveles de arcillita marrón oscuro, masivo, amorfo, soluble.

- **Formación Yantata**

Registrada a 1035.95 m (MD) y 963.80 m (TVD), la Formación Yantata está compuesta en su totalidad por psamitas, con intercalaciones de arcillitas marrón oscuro, masivo, soluble, plástico, blando en su tope. Las areniscas son de coloración gris claro, grano fino a medio, sub-angular, sub-redondeado, buena selección.

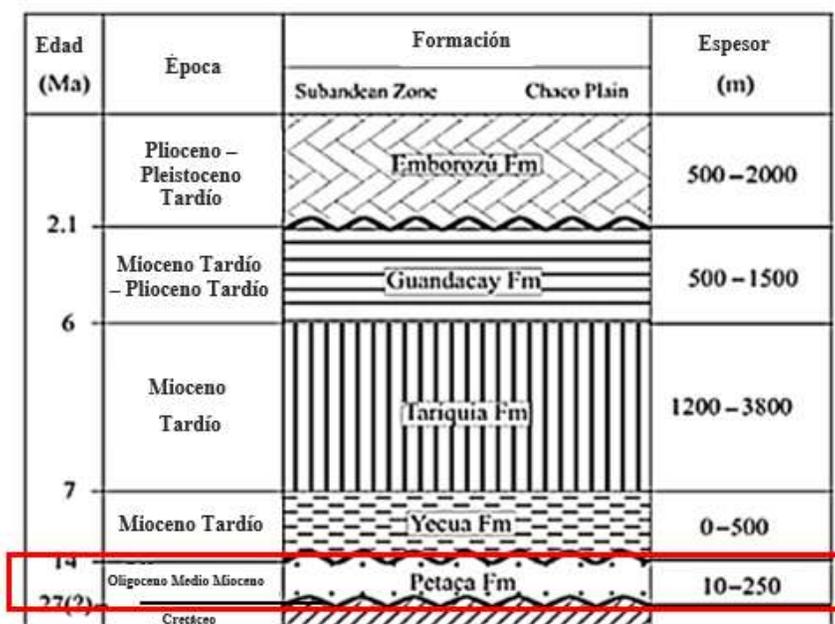
- **Formación Ichoa**

Registrada a 1159.30 m (MD) y 1074.20 m (TVD), la Formación Ichoa es en su generalidad psamítica, representada en su base por un horizonte conglomerádico, polimétrico, con fenoclastos de chert, cuarzo y areniscas.

Suprayacen areniscas rosáceas finas, friables y macizas, con intercalaciones rítmicas de areniscas limosas marrón rosadas a rojo ladrillo, de grano medio a grueso, y laminación entrecruzada, con areniscas blanquecinas de grano medio a fino con cuarzo ambarino, cemento calcáreo y fuerte entrecruzamiento.

Figura 3.4

Estructura de la zona Subandina y Chaco¹³



Edad (Ma)	Época	Formación		Espesor (m)
		Subandean Zone	Chaco Plain	
2.1	Plioceno – Pleistoceno Tardío	Emborozú Fm		500 – 2000
		Guandacay Fm		
6	Mioceno Tardío – Plioceno Tardío	Guandacay Fm		1200 – 3800
7	Mioceno Tardío	Tariquia Fm		
14	Mioceno Tardío	Yecua Fm		10 – 250
27(2)	Oligoceno Medio Mioceno	Petaça Fm		
		Cretáceo		

Fuente: Elaboración Propia

¹³ Las edades están basadas en Marshall et al. (1993), Moretti et al. (1996), Echavarría et al. (2003), Hulka (2005), y Hulka et al. (in press).

3.2. Introducción a la Petrografía

El análisis petrográfico permite analizar la composición, textura, microestructura, presencia y condiciones de diagénesis, para la confección de modas detríticas y elaboración de triángulos de procedencia. El estudio composicional de areniscas es una herramienta muy útil para caracterizar el área de procedencia de los sedimentos (Dickinson et al., 1985).

La composición final de los granos constituyentes de una roca sedimentaria (fragmentos de roca o minerales) depende básicamente de la geología del área fuente, de la durabilidad de los granos durante el transporte, del clima, de la topografía del área, la meteorización y modificación química, de la disolución y la diagénesis. Sin embargo, ha quedado demostrado que otros factores, tales como los ambientes deposicionales, el clima y la diagénesis, también pueden influir y modificar los detritos de estas rocas (Garzanti, 1986).

El análisis petrográfico permite conocer las características composicionales y texturales de los detritos presentes en las areniscas (tamaño de grano, redondez y selección). Esta caracterización petrográfica también incluye la determinación de aspectos tales como el tipo de contacto entre partículas, la porosidad, el contenido de matriz, la presencia y tipo de cemento y otras reacciones diagenéticas (Pettijohn et al., 1973, Tucker, 2001).

3.3. Preparación de Láminas Delgadas

Descripción de la muestra de estudio: Arenisca blaquécina cuarzosa masiva y poco compacta ver figura 3.5.

Figura 3.5

Muestra cortada en máquina cortadora de rocas



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

La preparación de las muestras de láminas delgadas se realizó en laboratorio de la Carrera de Ingeniería Petrolera de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) INSPET. El procedimiento es el siguiente:

- Corte de la roca en la máquina cortadora de rocas hasta un tamaño de 2x4x3 cm.
- Embebido en araldita por 48 hs y en cámara de vacío por 2 hs.
- Corte de una cara de la muestra embebida figura 3.5.
- Pulido con carbonato de Silicio en polvo de 600 micrones por 20 minutos y de 800 micrones por 15 minutos y lavado en el ultrasonido después de cada pulido.
- Desgaste del portaobjetos para facilitar la adhesión de la muestra.
- Preparación de epoxi con endurecedor y pegar las muestras cortadas al portaobjetos.
- Dejar por 2 hs en la cámara de vacío y se dejó secar por 24 hs más.

- Corte de la muestra adherida al porta objetos en la slicing grinding and lapping machine hasta alcanzar 0,03 mm.
- Desgaste de la muestra con carbonato de silicio en polvo de 600, 800 micrones y para el pulido final con 1000 micrones.
- Chequeo al microscopio para verificar su calidad de acabado que se define una vez que la muestra adquiera un color amarillento uniforme sin áreas oscuras en el microscopio de luz transmitida con nícoles paralelos.

3.3.1. Lijado de Porta Objetos

Este procedimiento consiste en el desgaste del portaobjetos, se lo realiza con la maquina Slicing – Grinding – Lapping Machine SGL 200, ilustrado en la figura 3.6. Este paso se lo realiza para que la muestra se adhiera mejor con el pegamento a la superficie de la muestra.

Figura 3.6

Izquierda, porta objetos previo al desgaste, derecha, posterior al desgaste con la Slicing – Grinding – Lapping Machine SGL 200



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

3.3.2. Corte de las Muestras

A partir de la muestra inicial, se procedió a cortar un trozo de la roca hasta que sus caras alcancen una superficie similar al del portaobjetos. En la figura 3.7 se observa el procedimiento de corte de la muestra en la máquina cortadora marca Vinci, modelo CS-200.

Figura 3.7

Corte de muestra en máquina cortadora marca Vinci, modelo CS-200



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

La elección de la cara que se estudiará, es la que corresponde al corte transversal del estrato, el cual es orientado al tomar la muestra en el terreno.

3.3.3. Pegado de la Muestra al Porta Objetos

El pegamento consiste en una resina Epoxi (Araldite 2020/A) y un agente de secado (Araldite 2020/B), mezclado en una proporción de 7: 1 ml, se mezcla lentamente durante tres minutos para evitar burbujas de aire y se deja reposar durante tres minutos antes de aplicarlo.

Figura 3.8

Resina Epoxi izq. y agente de secado Der. marca Araldite



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

El proceso de aplicación se realiza mediante la adición de pegamento en la muestra de roca preparada, con la superficie lisa en la parte superior. Posteriormente se coloca el vidrio desgastado y limpio sobre el pegamento.

Al agregar presión se eliminan las burbujas de aire; las burbujas de aire se las elimina debido a que podrían generar obstrucciones durante la observación en el microscopio. Las muestras se ponen a secar durante 24 horas.

Una vez cortada y pegada la muestra al porta objetos se procedió al limpiado con la máquina de ultrasonido Ulsonix Modelo Proclean 2.0 DS.

Figura 3.9

Proceso de limpieza de la muestra en preparación en el equipo de ultrasonido marca Ulsonix, modelo Proclean 2.0 DS



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Una vez limpiada la muestra se procede al secado de esta en una máquina de vacío VINCI durante 24 horas. Ver figura 3.10 adjunta.

Figura 3.10

Máquina de secado al vacío marca Vinci VEU



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Figura 3.11

Máquina de secado Magefesa



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

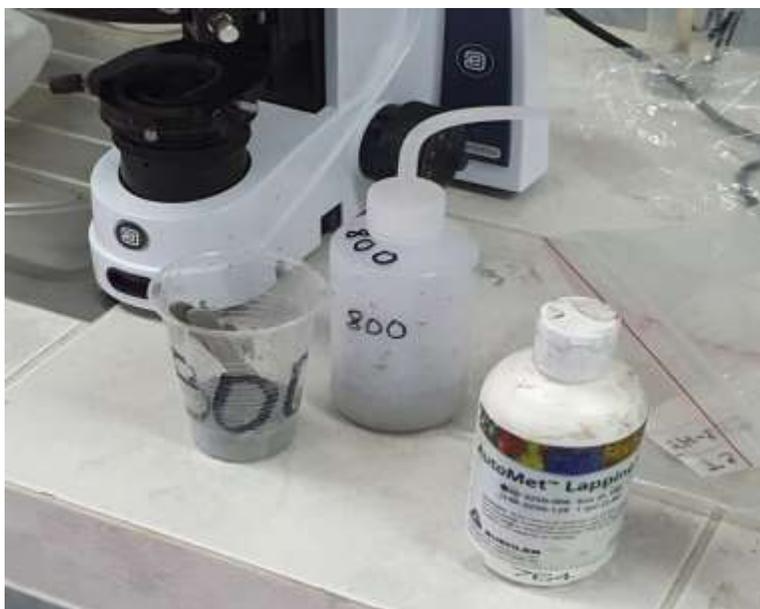
3.3.4. Pulido de las Muestras

Después de 24 horas de secado en la plancha con ayuda de la cortadora Marca Vinci, Modelo CS-200 se procedió a cortar la muestra, posteriormente se procede a pulir la muestra con polvo de sílice-carbono # 800 y # 1000 sobre una placa de vidrio, agregando agua destilada hasta que las muestras estén perfectamente planas.

Durante el pulido se debe tener cuidado de no sobrepasar más de 25 micras de espesor, debido a que la muestra podría desaparecer o no ser representativa durante la observación, en caso de cometer este error se debe repetir todo el procedimiento.

Figura 3.12

Polvo de carbonato de silicio #800 para el desgastado de las muestras



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

La sección de la roca en el portaobjetos debe alcanzar un espesor de 25 micrones.

Figura 3.13

Muestras en proceso de desgastado, preparadas en laboratorio



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Se repite el mismo procedimiento para obtener varias muestras y se las etiqueta para finalmente llevarlas a observación en el microscopio.

Figura 3.14

Muestras desgastadas listas y etiquetadas para su observación



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

3.4. Observación para el Análisis Petrográfico de las Muestras

Finalmente se procedió a observar las muestras en el microscopio para realizar la descripción petrográfica y determinación mineralógica. Ambos análisis se realizaron con ayuda de un microscopio óptico de luz transmitida con una cámara digital conectada a una computadora. Las respectivas descripciones se encuentran en el catálogo petrográfico.

Figura 3.15

Observación de las muestras en el microscopio



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA)

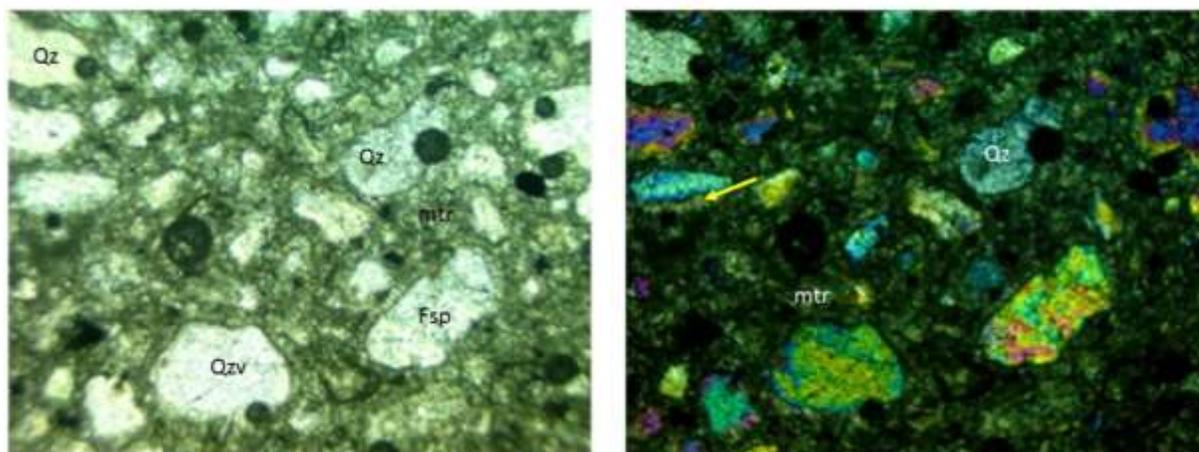
3.5. Resultados petrografía

La Formación Petaca está compuesta por areniscas de coloración gris claro, gris verdoso, grano fino a muy fino, regular selección, matriz arcilloso, leve cemento silíceo. Hacia la base se observan arcillitas de coloración marrón claro, amorfa, blanda, solubles.

La muestra objeto de estudio es una arenisca de grano medio a grueso, de color blanquecino a gris rosáceo, mal seleccionada, y con empaquetamiento pobre. Su compactación es pobre y es fácilmente deleznable. Por ello se procedió con el embebido en araldita, lo cual dificulta una fácil observación e identificación de todos los minerales.

Figura 3.16

Muestra 1



Ptc_4_HSR_X12D_1_5X_NP

Ptc_4_HSR_X12D_2_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

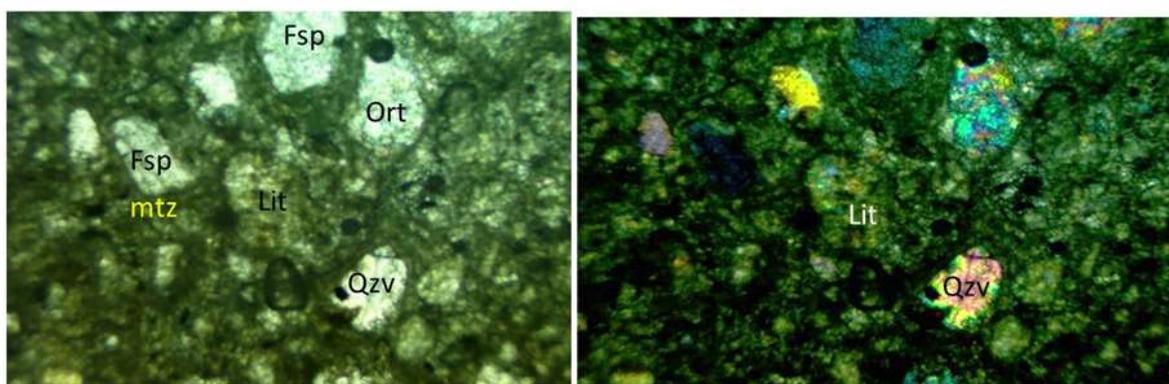
Figura 3.16.-Izquierda, fotografía digital de lámina delgada de la muestra, con nícoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nícoles cruzados.

Descripción: Granos del tamaño de arenisca de grano medio a fino, subangulares y mal seleccionados, con matriz limolítica. Empaquetamiento pobre donde se observa muy poco contacto entre los granos.

Mineralogía: Los granos gruesos están compuestos por cuarzo volcánico con presencia de “embayment”, corresponden a los de mayor tamaño y subredondeados, y los de menor, son angulares a subangulares. Asimismo, la presencia de feldespato (Fsp) es abundante y su forma dominante es subangular, algunos. La matriz es de tipo limolítica, compuesta principalmente de cuarzo. Granos presentan bordes irregulares producto de la alteración (flecha amarilla).

Figura 3.17

Muestra 2



Ptc_4_HSR_X12D_3_5X_NP

Ptc_4_HSR_X12D_4_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

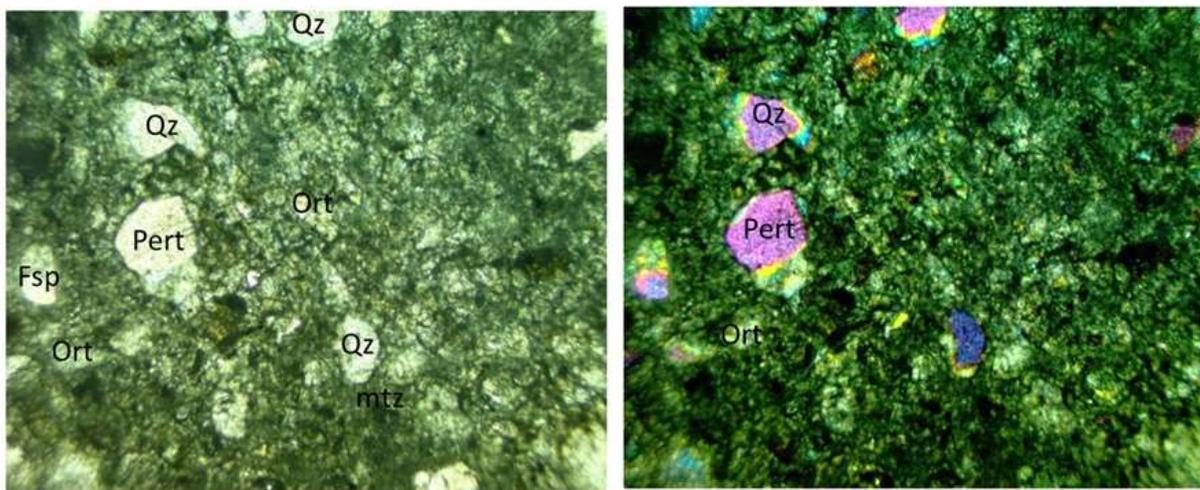
Figura 3.17.-Izquierda, fotografía digital al microscopio de lámina delgada con nícoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nícoles cruzados.

Descripción petrográfica: Granos del tamaño de arenisca de grano medio y fino. Los de mayor tamaño son subangulares y subredondeados, otras de menor tamaño son subangulares y angulares. El grado de selección es pobre al igual que el empaquetamiento. La matriz es limosa.

Mineralogía: Los granos de mayor tamaño consta de cuarzo volcánico (Qzv) que presenta el típico embayment. Los feldespatos (Fsp) presentan del tipo Ortosa (Ort), asimismo se observa un fragmento lítico (Lit).

Figura 3.18

Muestra 3



Ptc_2_HSR_X12D_1_5X_NP

Ptc_2_HSR_X12D_2_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

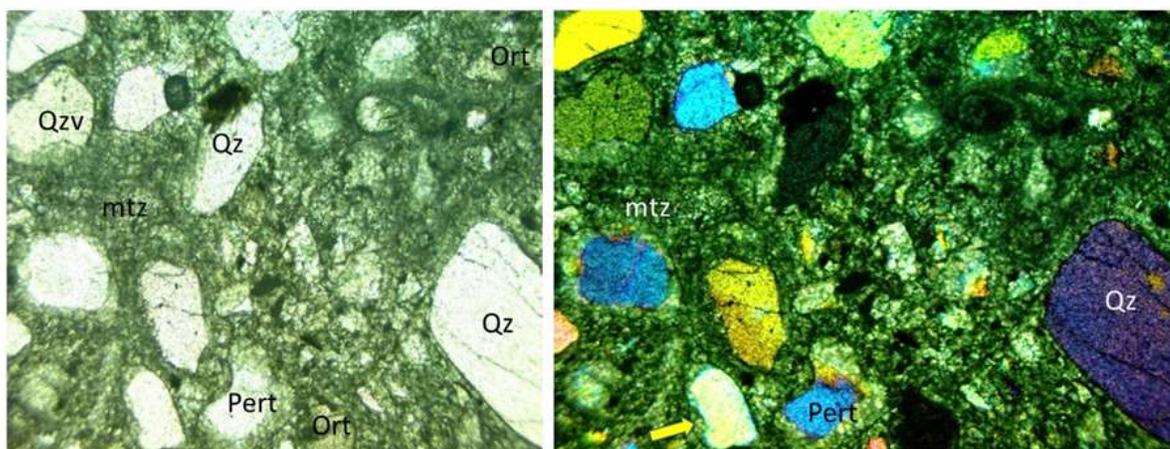
Figura 3.18.- Izquierda, fotografía digital de lámina delgada de la muestra, con nícoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nícoles cruzados.

Petrografía: Arenisca de grano medio a fino, subangular, mal clasificada y pobre grado de empaquetamiento. Matriz limosa.

Mineralogía: El grano más grueso es de feldespato potásico y perítico (Pert), los que siguen en tamaño corresponden a cuarzo (Qz) y más pequeños a ortoclasa (Ort). La matriz (mtz) limosa es de composición mayoritaria de cuarzo.

Figura 3.19

Muestra 4



Ptc_2_HSR_X12D_3_5X_NP

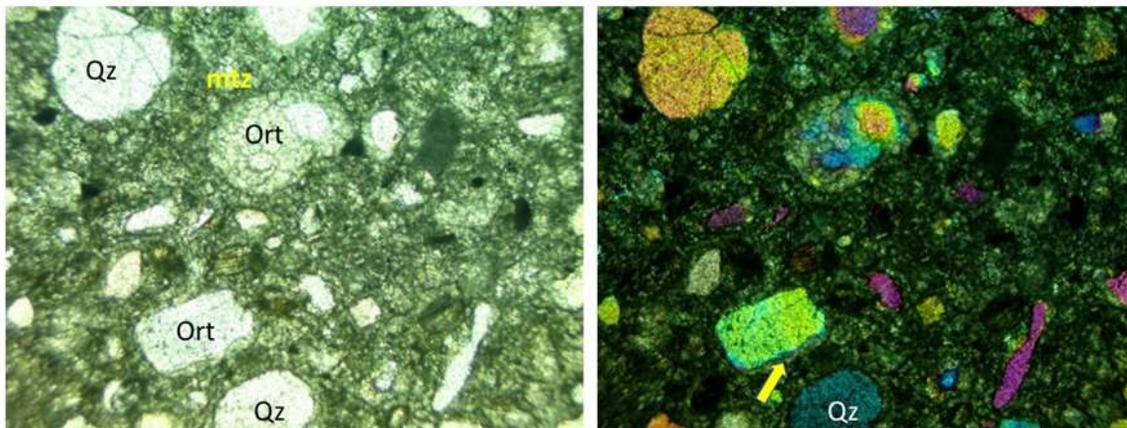
Ptc_2_HSR_X12D_4_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Figura 3.19.- Izquierda, fotografía digital de lámina delgada de la muestra, con nícoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nícoles cruzados.

Petrografía: Arenisca de grano grueso a medio, con clastos subangulares a subredondeados, clasificación moderada y pobre grado de empaquetamiento.

Mineralogía: Los granos más grandes corresponden a cuarzo (Qz), cuarzo volcánico (Qzv), seguido en tamaño por feldespatos peritítico (Pert), la matriz está dominada por cuarzo.

Figura 3.20*Muestra 5*

Ptc_2_HSR_X12D_5_5X_NP

Ptc_2_HSR_X12D_6_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

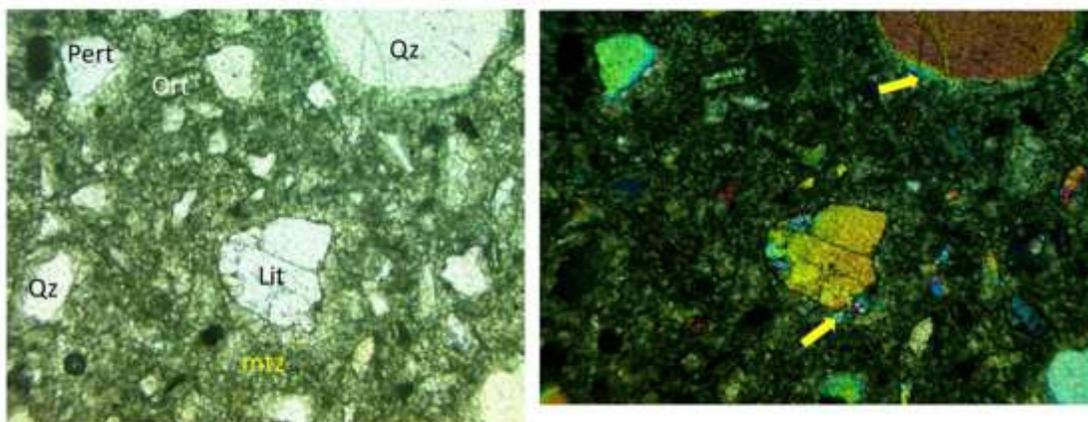
Figura 3.20.-Izquierda, fotografía digital de lámina delgada de la muestra, con nícoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nícoles cruzados.

Petrografía: Arenisca de grano grueso a medio, subredondeado a subangular, mal clasificada y con pobre grado de empaquetamiento, no se observa contacto entre las caras. Los granos más pequeños son más angulares. Matriz (mtz) limosa.

Mineralogía: Los granos más gruesos corresponden a cuarzo (Qz) y feldespatos del grupo de la Ortoclasa (Ort), con bordes irregulares que sugieren alteración (flecha amarilla).

Figura 3.21

Muestra 6



Ptc_2_HSR_X12D_7_5X_NP

Ptc_2_HSR_X12D_8_5X_NC

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Figura 3.21.-Izquierda, fotografía digital de lámina delgada de la muestra, con nicoles paralelos y aumento de 5x. Derecha, la misma imagen con nicoles cruzados.

Petrografía: Grano grueso, pobre grado de clasificación con tres tamaños de granos. Los más grandes bien redondeados a subredondeados y en menor proporción subangulares. Matriz (mtz) de grano fino limolítica.

Mineralogía: Los granos más gruesos son cuarzo (Qz) con recristalización en el borde, seguido de feldespato perítico (Pert) y de lítico (Lit) de probable origen metamórfico. Matriz limo-cuarzosa.

3.6. Geoquímica

3.6.1. Metodología de Análisis Geoquímico

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Geología de la Universidad de Stavanga de Noruega.

Los métodos aplicados son XRD y de roca total.

3.6.1.1. Difractometría de Rayos –X

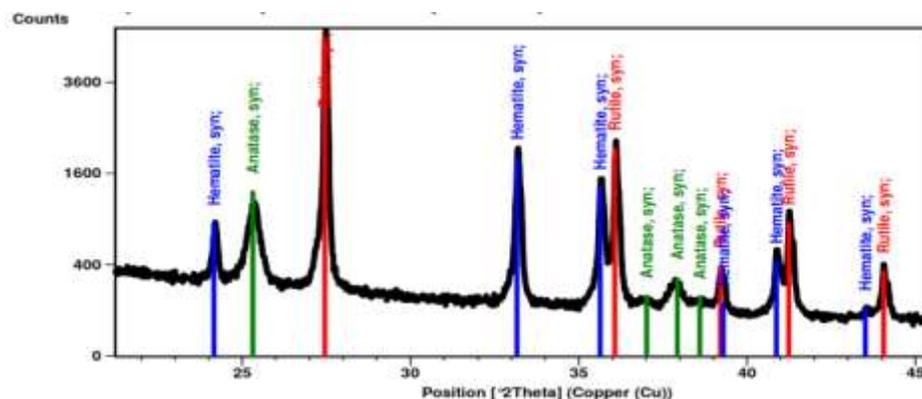
El método de XRD (X Ray Diffractometer) o difractometría de rayos-X, permite la identificación de rocas cristalinas desconocidas (minerales, o componentes químicos inorgánicos). El equipo consta en su forma básica de la combinación de los siguientes componentes: un tubo donde ocurre el bombardeo de rayos X, un enfriador a base de agua y una cámara. Para el análisis se procede a la molienda de las muestras de la cual, una fracción se lleva al tamizado en un tamiz de 63 micrones para análisis de minerales pesados y la otra, a la pulverización en un molino de bolas. La muestra pulverizada se monta en el porta muestras en una cantidad de 3 gramos aproximadamente, bien compactadas, para introducirla en la cámara del Difractómetro de Rayos X.

Un patrón de difracción de rayos-X es un área sometida a intensidad de rayos-x a diferentes ángulos de una muestra. El proceso consiste en lo siguiente:

- El detector se mueve en círculo alrededor de la muestra, cuya posición está ubicado con un ángulo de 2θ .
- El registro del detector del número de rayos-X se registra cada vez que alcanza el ángulo 2θ .
- La intensidad de rayos-X es usualmente registrado como “conteo” o como “conteo por segundo” (figura 3.22).

Figura 3.22

Ejemplo de lectura de un XRD de las diferentes fases de una muestra.



Fuente: Elaboración Propia

- Para mantener el bombardeo de rayos-X enfocado, la muestra también debe rotar.
- Los patrones de difracción de una mezcla es una simple suma de los patrones de difracción de cada fase individual.

A partir de los patrones de XRD se puede determinar:

- Qué fases cristalinas están en la mezcla.
- Cuánto de cada fase cristalina está en la mezcla (análisis cuantitativo de la fase, QPA).

3.6.2. *Análisis de Datos de Geoquímica*

3.6.2.1. **Introducción a la Geoquímica de Rocas Sedimentarias**

Los estudios de procedencia en las rocas sedimentarias apuntan a descifrar la composición, la evolución geológica de las áreas fuente de los detritos, y la caracterización del ambiente tectónico de la cuenca sedimentaria. La incidencia de efectos secundarios tales como selección, meteorización y metamorfismo, puede ocultar la información que brindan los distintos indicadores que se usan para evaluar las áreas de procedencia de las sedimentitas. Para una mejor comprensión

es necesario realizar un análisis combinado de metodologías teniendo en cuenta el trabajo de campo, la petrografía y la geoquímica (Garrels & MacKenzie, 1971).

Los procesos tectónicos de placa imprimen su sello geoquímico distintivo en dos formas separadas. Primeramente, diferentes ambientes tectónicos tienen características de proveniencia distintivas y segundo, se caracterizan por procesos sedimentarios distintivos. Existen cuatro tipos de ambientes de cuencas sedimentarias (Bathia and Cook, 1986):

- ❖ Cuencas de Arco de islas oceánico-Ante-arco y tras-arco, adyacente al arco volcánico desarrollado en la corteza continental delgada.
- ❖ Cuencas de Arco de islas—interarco, antearco, o tras-arco adyacentes a arco volcánico desarrollado en una corteza continental espesa o margen continental delgado
- ❖ Cuencas de Margen continental activo—tipo Andino desarrollado sobre o adyacente a un margen continental espeso. Cuencas tipo strike-slip también desarrolladas en este tipo de ambientes.
- ❖ Rift de Margen continental pasivo—margen continental desarrollado sobre una corteza espesa sobre los bordes de los continentes, cuencas sedimentarias sobre el borde trasero de un continente.

La geoquímica de rocas sedimentarias permite estimar la composición total de la roca, los procesos de diagénesis, el paleoambiente al que ha sido expuesto el sedimento durante su transporte y sedimentación, la madurez de la roca, su clasificación y procedencia. Los datos son el resultado del análisis de roca total, los que son ploteados en diagramas adecuados para el respectivo análisis e interpretación (Garrels & MacKenzie, 1971).

En el presente capítulo nos referimos al análisis geoquímico de la formación Ravelo, para su caracterización a partir de los datos de laboratorio XRD y de roca total. El objetivo de este capítulo

será la evaluación e interpretación de los datos geoquímicos, e inferir el grado de alteración o de meteorización y de procedencia. La presente tesis está orientada a la evaluación, análisis e interpretación de los datos geoquímicos de la formación Petaca.

3.6.2.2. Elementos Mayoritarios

Los elementos mayoritarios permiten inferir la madurez de la roca a partir de la definición de sus componentes detríticos, así como la posición paleogeográfica y paleotectónica de la cuenca depósito. La tabla 3.1, presenta los elementos mayoritarios de la muestra objeto del presente estudio.

Tabla 3.1

Elementos mayoritarios

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
TOPE	67.00	2.98	0.47	0.32	14.51	0.13	1.93	0.09	0.04	0.06

Lim de detección 0,01 %

Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

Los elementos mayoritarios representan la composición mineral primaria de las rocas sedimentarias (Nesbitt y Young, 1987), sin embargo, algunas son más sensibles a la meteorización química pre y post deposicional. Durante la erosión y transporte se incrementa la abundancia de argilominerales pobres en cationes, óxidos de Hierro y Aluminio a costa de otros argilominerales detríticos no arcillosos. La SiO₂ es el principal componente del cuarzo, se caracteriza porque es el más abundante y resistente en la naturaleza, las propiedades del cuarzo están relacionadas a su formación y a la sobreposición a posteriores eventos geológicos, por tanto, refleja la madurez de la roca sedimentaria. Desde el punto de vista genético existen 6 tipos de cuarzo: plutónico,

volcánico, venas de cuarzo y cuarzo metamórfico (recristalizado, esquistosa y extendido) (Blatt, 1967).

Los datos de SiO_2 de la tabla 1, muestran que la formación Petaca tiene valores altos, con un valor de 67%. A partir de este dato se sugiere que la formación Petaca tiene un alto grado de madurez.

El CaO se concentra en las plagioclasas, calcita y aluminosilicatos. Los datos muestran que es el segundo más abundante con un 14,51%.

El Al_2O_3 es un componente principal en las arcillas. Los datos de la Tabla 1 muestra que este componente es apenas el 2,98%. Se puede atribuir que la formación Petaca no está fundamentalmente controlada por la presencia de aluminosilicatos y de feldespatos.

3.6.2.3. Índice de Alteración CIA

El índice químico de alteración (CIA: Chemical Index of Alteration) se aplica para determinar el grado de meteorización de las rocas. El valor del CIA aumenta a medida que la meteorización química aumenta, y se calcula con las proporciones molares de Al_2O_3 , CaO, Na_2O y K_2O (Besbit y Young, 1982) (Tabla A2). El diagrama A-CN-K en conjunto con el CIA (Figura 3.23) sirve para establecer las tendencias de meteorización, K-metasomatismo y la composición de las rocas (Fedo et al, 1995).

Con las relaciones Nb/Y versus Zr/Ti (figura 3.27), se puede establecer una clasificación de rocas volcánicas y sedimentarias ya que estos elementos son fuertemente inmóviles. Valores altos de Zr/Ti se asocian con minerales félsicos y valores bajos con minerales máficos. Por otra parte, altos valores de Nb/Y son asociados con magmatismo alcalino (Winchester y Floyd, 1977). Las relaciones Zr/Sc y Th/Sc (figura 3.28) sirven para identificar procesos de reciclado de sedimentos, así también, el carácter tectónico del material detrítico. El Th/Sc monitorea la variación composicional de la fuente, mientras que altos valores de Zr/Sc son asociados con enriquecimiento

de zircón por reciclado de sedimentos (*McLennan et al, 1993*). Por su parte, las relaciones de Ti/Zr y La/Sc (figura 3.29) son utilizadas para discriminar entre diversos arreglos tectónicos de procedencia del material detrítal (*Bhatia y Crook, 1986*). Todos los valores calculados de las relaciones mencionadas están en la tabla A3 de los anexos.

Los elementos mayoritarios representan la composición mineral primaria de las rocas sedimentarias (Nesbity y Young, 1987), sin embargo, algunas son más sensibles a la meteorización química pre y postdeposicional. Durante la erosión y transporte se incrementa la abundancia de argilominerales pobres en cationes, óxidos de hierro y aluminio a costa de otros argilominerales detríticos no arcillosos. El Índice de Alteración CIA permite estimar la intensidad de meteorización y se calcula con la siguiente fórmula:

$$CIA = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right) * 100\%$$

La variación del CIA refleja el grado de meteorización a través de los cambios producidos en su composición química, de manera progresiva, producto de la alteración por eliminación de cationes lábiles como Ca, Na y K respecto a los constituyentes residuales estables como el Al y el Ti. Según Nesbitt y Young (1982) varía desde ~ 50 en feldespatos, a ~75 para la muscovita y de 75 a 85 para la illita-montmorillonita que es función del clima dominante, por lo tanto, se asume como indicador paleoclimático. En el caso de la caolinita, clorita y gibsita es ~100.

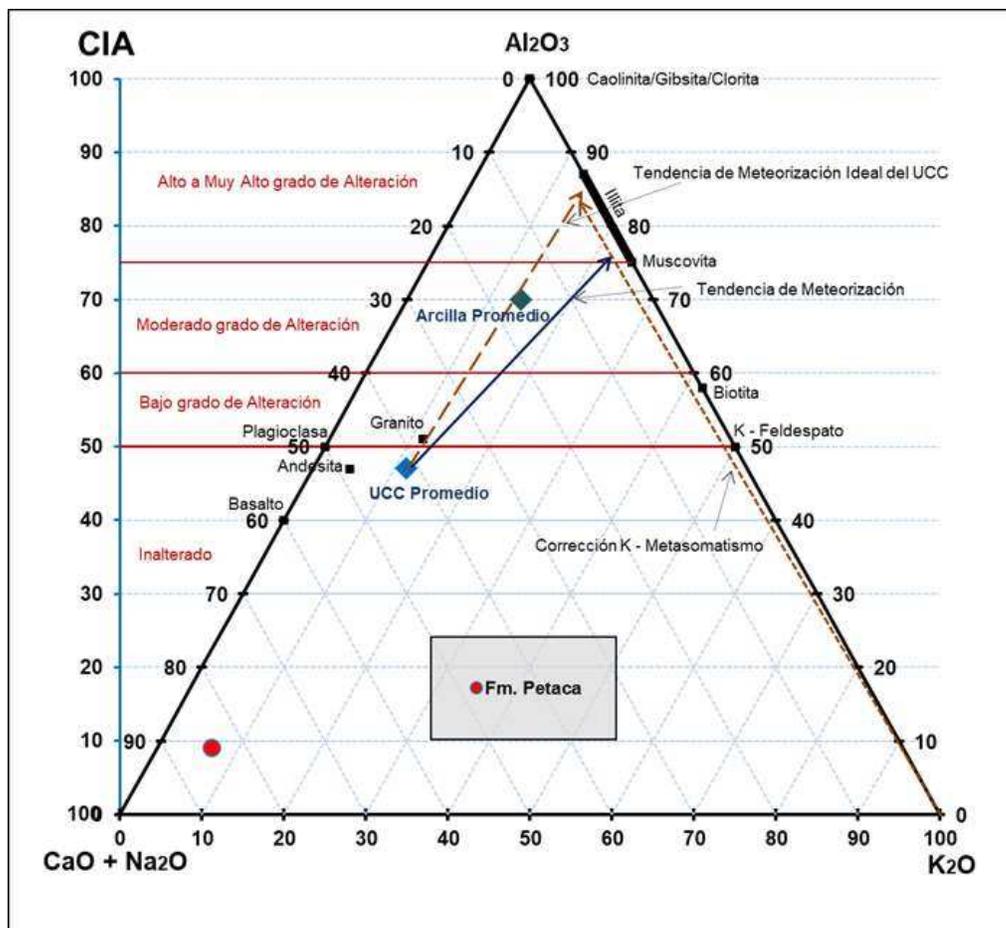
En base a lo expuesto se ha estimado que, para la muestra de la formación Petaca, el valor del CIA es de 9,18, según la clasificación de Fedo et al, (1995), corresponde a una meteorización muy baja, es decir no presenta alteraciones.

De acuerdo al Tabla A2 y el diagrama A-CN-K (figura 3.23) se observa que la muestra de la sección Petaca presenta concentración muy baja de alúmina (Al_2O_3), con un valor de 9.18%,

también se exhibe contenido bajo de K_2O con un valor de 6.61%, pero se tiene concentración muy alta de $CaO+Na_2O$ con el valor de 84.20%.

Figura 3.23

Diagrama $Al_2O_3 - (CaO+Na_2O) - K_2O$ ¹⁴



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

El círculo rojo representa el ploteo con datos de la Formación Petaca. Los cuadros azules son valores de distintos minerales según McLennan (1993). Composiciones promedio de arcilla y UCC

¹⁴ (Después de Fedo et al, 1995) y a la izquierda el CIA (después de Nesbitt y Young, 1982).

de acuerdo a Taylor y McLennan (1985). Tendencia de meteorización ideal del UCC predicha por Nesbitt & Young (1984). Correcciones por *K* – metasomatismo de acuerdo a Fedo *et al.* (1995).

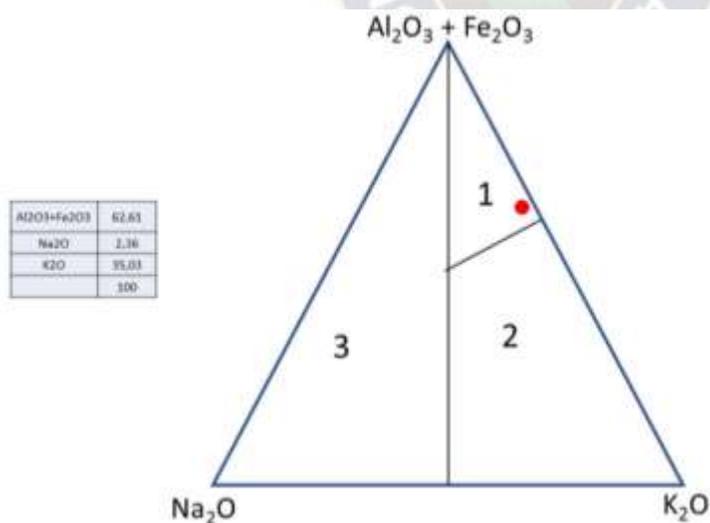
3.6.2.4. Composición de la roca

La variación composicional de la roca es posible conocer mediante el cálculo del Índice de Variabilidad Composicional ICV, que tiene que ver con las variaciones composicionales, basado en la abundancia relativa de aluminio respecto a otros cationes mayoritarios (Cox *et al.*, 1995).

Para la clasificación de la roca, se procedió al ploteo de los datos en el diagrama ternario que toma en cuenta el contenido de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O_3 y K_2O_3 . Estos elementos mayoritarios son componentes importantes de las rocas sedimentarias, que llevan en sus componentes litológicos y varían con la proporción de componentes arcillosos, y de feldespatos. Para la representación se realizó un recálculo de estos componentes al 100%.

Figura 3.24

*Diagrama ternario*¹⁵



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

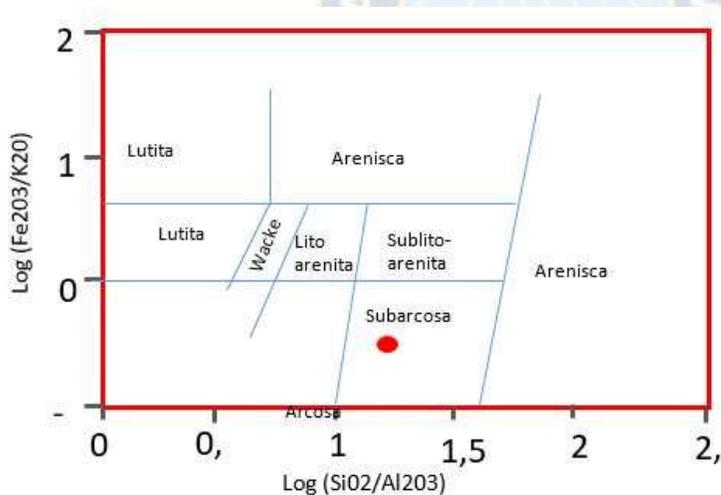
¹⁵ Para la clasificación de una arenisca en la que se delimita tres campos. Campo 1: Areniscas potásicas ferromagnesianas, 2: Areniscas potásicas, 3: Areniscas sódicas. El punto rojo, representa a la muestra objeto del presente estudio.

De acuerdo a la proporción de los componentes de $Al_2O_3 + Fe_2O_3$, Na_2O_3 y K_2O_3 , los valores de la muestra en estudio, plotea en el campo que corresponde al campo 1 que sugiere una roca de Arenisca potásica ferromagnesiano, cerca del campo 2.

Otro diagrama que permite clasificar la roca es el de Pettijohn, (1963), el cual tiene aplicación en las areniscas. El diagrama es binario y tiene delimitados los campos desde Grawaca, arenita lítica, arcosa, subarcosa, arenita sublítica y cuarzo arenita, en función de los contenidos de Na_2O , K_2O , SiO_2 y Al_2O_3 . El dato que fue ploteado para la muestra se ve en la figura 3.25.

Figura 3.25

Diagrama de clasificación química de rocas según Pettijohn, (1963)



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

3.6.2.5. Elementos minoritarios

3.6.2.5.1. Composición Geoquímica de Elementos Trazas y Tierras Raras (REE):

Los elementos minoritarios son aquellos que se registran en un análisis geoquímico en valores menores a 5 ppm (partes por millón), son clasificados como elementos traza. La concentración de los elementos trazas, resulta de la influencia del área de aporte, en la que intervienen la

meteorización, la diagénesis y la selección de los sedimentos. Los elementos tienden a ser transferidos desde las rocas de aporte a los sedimentos sin sufrir fraccionamiento. También poseen una baja movilidad (cuán móviles son en el ambiente supergénico) durante la meteorización, el transporte y la diagénesis. Los elementos no ingresan fácilmente en la estructura cristalina de los minerales, simplemente se añaden como partículas en la superficie de los minerales de arcilla o son incluidos como intercapas en lugar de los cationes. Los elementos trazas reflejan la composición de la roca de aporte y permiten ser aplicados en la identificación de los procesos geoquímicos para conocer la procedencia de las rocas sedimentarias.

El Contenido de las tierras raras (REE) representan los indicadores de procedencia más confiables como indicadores de procesos geoquímicos para establecer las rocas sedimentarias. Los sedimentos se transfieren de manera no fraccionada, reflejando un promedio de la composición de los REE del material de aporte.

Tabla 3.2

Elementos minoritarios

Be	Co	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb	Ba	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	Sc	U	V
ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	0.2	13	0.1	0.5	0.1	0.1	1	0.1	1	0.5	0.1	0.2	1	0.1	8
<1	1.3	<13	0.5	2.1	2.9	2.1	556	56.2	<1	140.0	0.2	2	3	0,5	34

W	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	0.3	0.05	0.02	0.05	0.01	0.05	0.02	0.03	0.01
<0.5	12.7	15.8	16.8	9.6	0.45	3.5	.54	0.68	2.59	0.41	2.55	0.53	1.69	0.26

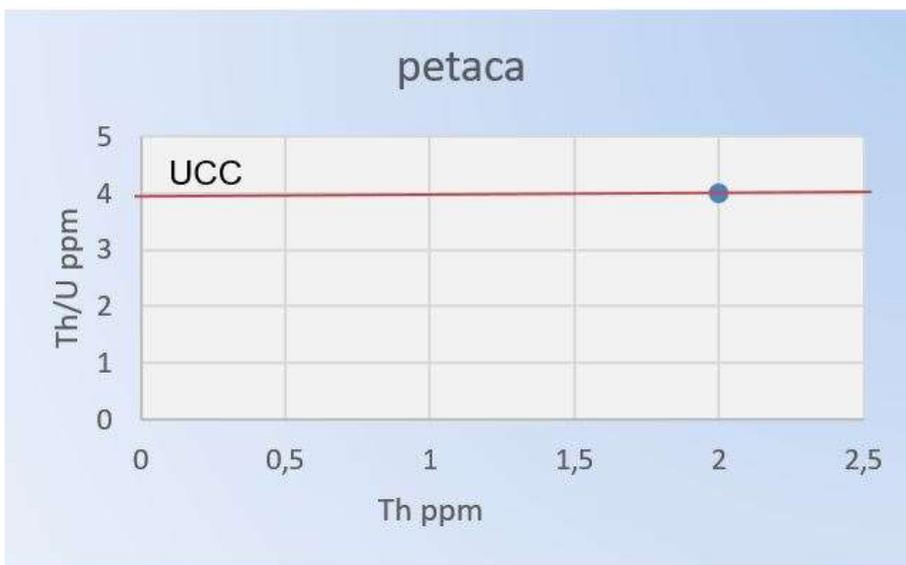
Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.05	0.01	0.1	0.1	0.1	1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.01	0.1	0.5
1.72	0.25	0.1	1.6	2.4	5	1.4	2.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	3.2	0.01	<0.1	<0.5

Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

El diagrama de McLennan, 1993, figura 3.26, toma en cuenta la relación U y Th, que son los elementos altamente móviles. La pérdida de U tiene relación con el grado de alteración de la roca, por lo tanto, su enriquecimiento significa que la muestra tiene menor grado de alteración.

Figura 3.26

Diagrama binario de McLennan¹⁶, 1993



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

La relación Th/U de la muestra tiene un valor de 4, que cae en el nivel de UCC (composición de la Corteza Superior). Este tenor de U posiblemente corresponde a que esta es altamente incompatible y resistente a la meteorización, además puede deberse a la presencia de rocas ácidas como graníticas (alto contenido de Si₂O).

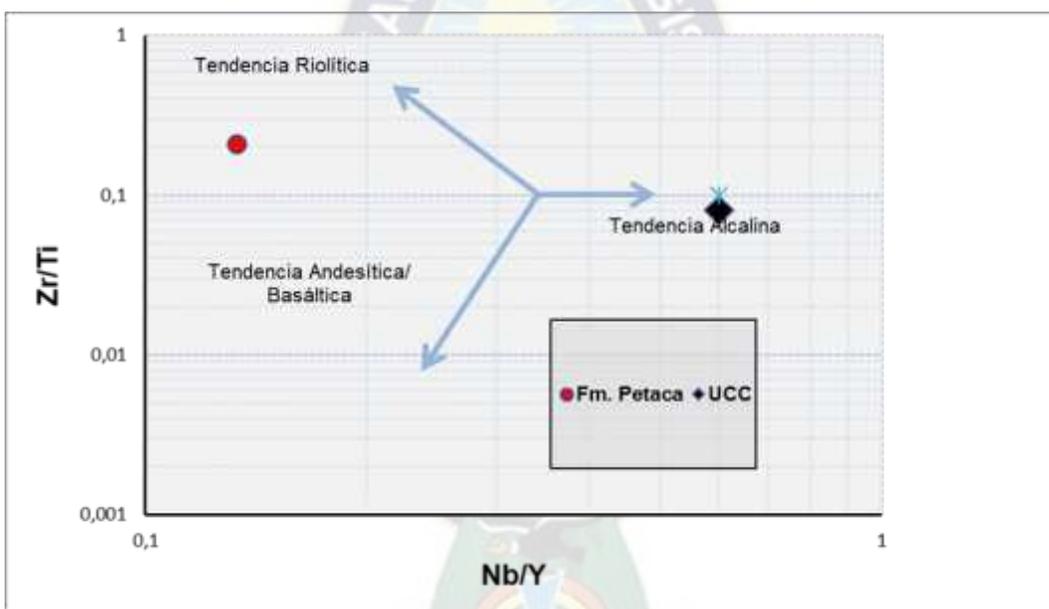
En el diagrama Nb/Y vs Zr/Ti (figura 3.27) y en la tabla A3, se observa que la muestra de la formación Petaca presenta una relación de Zr/Ti de 0,2087, además de tener un valor de Nb/Y de 0,1329.

¹⁶ para valorar la alteración de la roca. UCC, Upper Continental Crust.

Según la roca analizada en el diagrama Nb/Y vs Zr/Ti; se localiza en el campo de la tendencia Riodacita (roca volcánica entre dacita y riolítica) y dacita (roca volcánica compuesto por andesita). La riolita y la dacita son rocas volcánicas. Proviene de un magma con más del 65% de SiO₂ por lo que se puede establecer que corresponde a un magma ácido. En términos generales son rocas con un alto contenido de Sílice, es decir cuarzo mayor al 20% y la principal diferencia entre las dos son la cantidad de los Feldespatos (Potásico y Plagioclasa).

Figura 3.27

Diagrama Nb/Y vs Zr/Ti¹⁷



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

¹⁷ Para clasificación de rocas volcánicas y sedimentarias (Van Staden et al., 2014, después de Winchester and Floyd, 1977). Las flechas azules muestran las tendencias composicionales. El círculo rojo representa a la formación. El rombo negro es la composición promedio de la UCC (Zr/Ti≈0,08 y Nb/Y≈0,6) según McLennan et al. 2006.

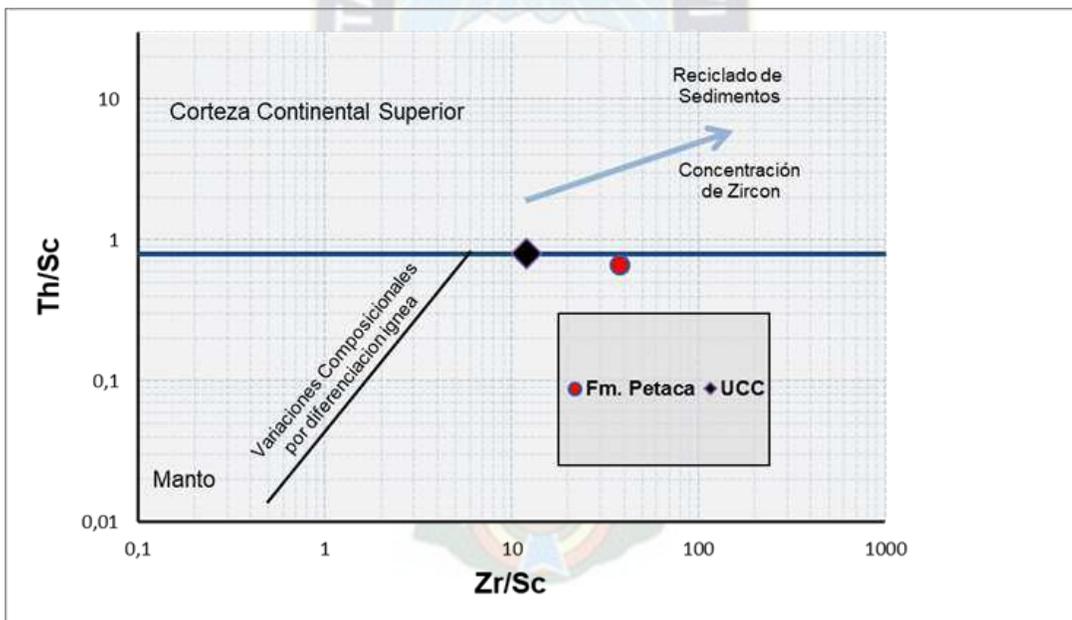
3.6.2.6. Reciclado (transporte y selección) de rocas sedimentarias

Del diagrama Zr/Sc vs Th/Sc (figura 3.28) y la tabla A3, se aprecia que la Th/Sc para la formación Petaca es alta, con 0,6667. Zr/Sc también tiene valor alto de 37,5667.

Del análisis se puede observar que la muestra es cercana o se proyecta en el campo de la Corteza Continental Superior que define el área de proyección general de las rocas con composición similar a la corteza continental superior, en la cual las muestra en estudio se enriquece de minerales pesados, notablemente circón, debido a la clasificación sedimentaria y al reciclaje (transporte y selección).

Figura 3.28

Diagrama Zr/Sc vs. Th/Sc¹⁸



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

¹⁸ Para monitoreo de reciclado de sedimentos y análisis de procedencia (después de McLennan et al., 1993). La flecha azul representa la tendencia de reciclado (enriquecimiento de zircon). El círculo rojo representa a la formación. El rombo negro es la composición promedio de la UCC (Zr/Sc≈12 y Th/Sc≈0,8) según McLennan et al. 2006.

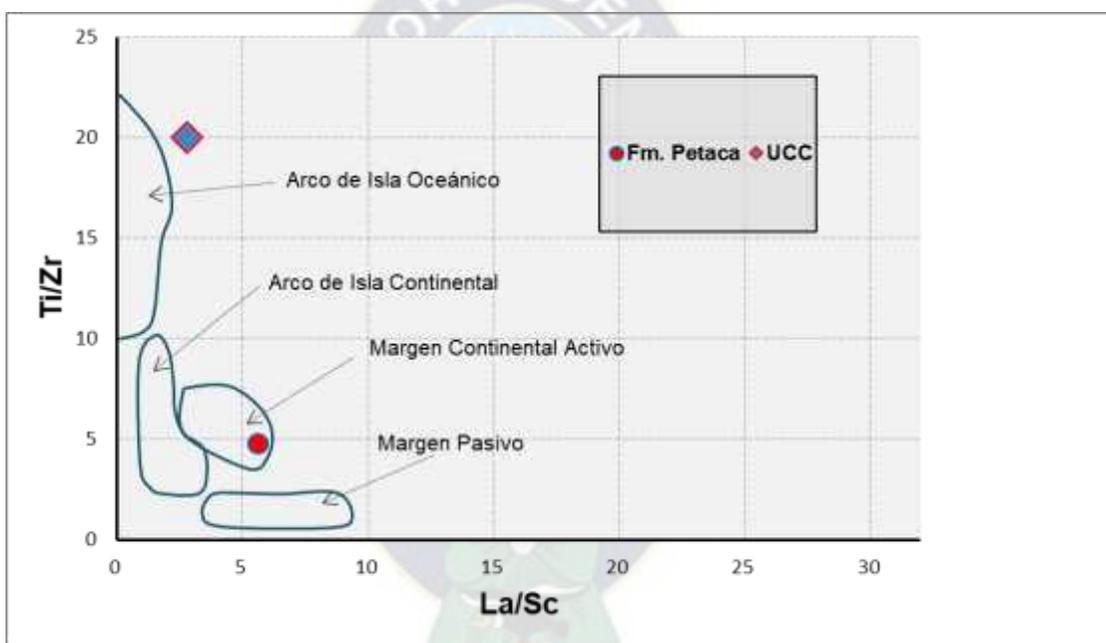
3.6.2.7. Ambiente tectónico

Del diagrama La/Sc vs Ti/Zr (figura 3.29 y la tabla A3), se puede notar que la relación Ti/Zr de muestra de la formación Petaca es moderada, con 4,7915, mientras que La/Sc es 5,6000.

Las concentraciones de La, Ti, Zr y Sc que presenta la muestra, sugiere para la muestra de la formación Petaca el ambiente es de margen continental activo, como se muestra en la figura 3.29.

Figura 3.29

Diagrama La/Sc vs Ti/Zr¹⁹ de Bathia et al, 1986 en Zimmermann and Spalletti, 2009.



Fuente: Elaboración Propia (Laboratorio de Ingeniería Petrolera - UMSA).

¹⁹ Para discriminación del arreglo tectónico de procedencia (después de Bathia y Crook, 1986). Diferenciados los regímenes tectónicos de márgenes activos y pasivos, y los arcos de islas continentales y oceánicas. El círculo rojo representa a la formación. El rombo azul es la composición promedio de la UCC (La/Sc≈2,8 y Ti/Zr≈20,0) según McLennan et al 2006.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

De acuerdo a los datos obtenidos en los laboratorios tanto petrográficos, mineralógicos y geoquímicos, las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

- El pozo HRS permitió conocer datos adicionales de la Fm Petaca que es roca reservorio de 15 campos productores de gas en el Subandino Sur del país.
- La muestra de la Fm Petaca tiene características físicas que dificultaron la elaboración de láminas delgadas por lo que se requirió pasos adicionales para la obtención del resultado favorable.
- La composición petrográfica varía desde una litología de arenisca de grano medio a fino incluso grueso, la forma de los mismos es en general subangular, mal clasificado y pobre grado de empaquetamiento, matriz limosa.
- En función a la petrografía de la muestra de la Fm Petaca, como la heterogeneidad en la forma de granos y el contenido de matriz, sumado a la baja compactación contribuyen a una alta porosidad y permeabilidad, para constituirse en un reservorio óptimo.
- La composición mineralógica consta de areniscas cuarzosas subfeldespáticas donde se registró Ortoclasa principalmente, así como de feldespato perítico. También se observa en algunos casos recristalización en el borde de los granos de cuarzo. Estos rasgos sugieren inestabilidad de los minerales feldespáticos que afectarían a una variación en la porosidad de la roca.
- Los datos geoquímicos muestran en sus componentes mayoritarios un contenido de Si_2O del 67% lo cual indica una importante presencia de cuarzo, sin embargo, este componente

forma parte también de los feldespatos junto al Al_2O_3 y el pobre contenido de Fe_2O_3 , de 0,47 %, se debe al pobre contenido de minerales arcillosos.

- El Índice de Alteración (CIA) indica una roca inalterada de acuerdo al diagrama ternario de Nesbitt y Young, 1982.
- A partir de la composición geoquímica de la muestra, esta clasifica como arenisca potásica ferromagnésiana.
- De acuerdo al comportamiento de los elementos minoritarios Th/U vs Th del diagrama de McLennan, 1993, corresponde a una composición del rango de la corteza continental superior (UCC) de probable procedencia de rocas ácidas como graníticas.
- El ambiente tectónico de procedencia, de acuerdo a sus componentes Ti/Zr vs La/Sc, diagrama de Bhatia y Crook, (1986) plotea en el campo de margen continental activo.
- La información proporcionada por el estudio geoquímico y petrográfico, sugieren que la composición cuarzosa y feldespática de la roca, alteran el empaquetamiento (compactación), y la porosidad primaria, como consecuencia de su roca madre proveniente de un ambiente de tipo “margen continental activo”.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2019; <https://www.anh.gob.bo/w2019/>
- Análisis sedimentológico y estratigráfico a partir de la integración de datos de superficie y subsuelo en reservorios gasíferos de la formación petaca (Oligoceno-Mioceno), Campo Tajibo, Vergani G., González G., Poiré D. G. y Tineo D., 2012., Bolivia.
- Atlas de Rocas Sedimentarias, Adams A.E. MacKenzie W.S. & Guilford C., et al., *Ed* Masson, 1997.
- “Compendio de Geología de Bolivia”. Revista Técnica de YPF, Suárez Soruco, R., v. 18, n. 1-2, p. 1-144. 2000.
- Effects of chemical weathering & sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies, Nesbitt, Young, McLennan, Keays, *Journal of Geology*, 1996, 104: 525-542.
- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements, Winchester, J., & Floyd, P. (1977), *Chemical Geology* Vol. 20, 325-343.
- Hulka C. “Sedimentary and tectonic evolution of the Cenozoic Chaco foreland basin, southern Bolivia”. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades im Fachbereich Geowissenschaften an der Freien Universität, Berlin - Germany. 2005.
- “Interpretación Estratigráfica y Sedimentológica de Unidades Terciarias y Jurásicas en el pozo Curiche 1002, en base a imágenes de pozo, Campo Curiche, Bolivia”. XIX Congreso Geológico Boliviano, Vergani G., M. París, G. González y M. Pereira, Tarija.pp, 2010.

- Métodos y técnicas de investigación y aprendizaje, Arandia S. L., Arandia T. C., Artes gráficas Catacora, 2013.
- Relationships between the trace elements composition of sedimentary rocks and upper continental crust, McLennan, S. M., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4): 1021-45.
- Stages of textural maturity in sedimentary rocks, Folk, R.L., *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 21, 1951, p. 127-130.
- Sedimentary provenance studies, Haughton, P.D.W., Todd, S.P., A.C. Morton, A.C., Geological Society, London, 1991, v. 57, p1-11.
- The Petaca (Late Oligocene-Middle Miocene) and Yecua (Late Miocene) formations of the Subandean-Chaco Basin and their tectonic significance, Marshall L. G., Sempere T & Gayet M., Bolivia, 1993.
- Trace elements characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins, Bathia, M. R. y Crook, K. A. W., 1986, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92: 181-193.
- Uba, C.E. "Late Cenozoic evolution of the Chaco Foreland Basin, Bolivia." Ph. D. Thesis, Freien Universitat Berlin, Germany, 2005.

Anexo 1

Tabla A1 Porcentaje Composicional Mineralógico

	LF200	TC000	TC000	LF200																		
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO	LOI	Sum		TOT/C	TOT/S	Be	Co	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb
Detection limit:	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-5.1	0.01		0.02	0.02	1	0.2	13	0.1	0.5	0.1	0.1
Sample																						
TOPE	67.00	2.98	0.47	0.32	14.51	0.13	1.93	0.09	0.04	0.06	12.3	99.91		3.29	<0.02	<1	1.3	<13	0.5	2.1	2.9	2.1

| LF200 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ba | Rb | Sn | Sr | Ta | Th | Sc | U | V | W | Zr | Y | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er |
| ppm |
| 1 | 0.1 | 1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 1 | 0.1 | 8 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.02 | 0.3 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.03 |

556	56.2	<1	140.0	0.2	2.0	3	0.5	34	<0.5	112.7	15.8	16.8	19.6	3.45	13.5	2.54	0.68	2.59	0.41	2.55	0.53	1.69
-----	------	----	-------	-----	-----	---	-----	----	------	-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

LF200	LF200	LF200	AQ200																			
Tm	Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se						
ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm																	
0.01	0.05	0.01	0.1	0.1	0.1	1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.01	0.1	0.5	0.01	0.1	0.1	0.1	0.5	

0.26	1.72	0.25	0.1	1.6	2.4	5	1.4	2.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	3.2	0.01	<0.1	<0.5					
------	------	------	-----	-----	-----	---	-----	-----	------	------	------	------	-----	------	------	------	--	--	--	--	--

Anexo 2

Tabla A2 Cálculo del Chemical Index of Alteration (CIA)

Formation/sample	Sample	Al ₂ O ₃			CaO		Na ₂ O		CaO+Na ₂ O		K ₂ O			Total	CIA
		wt %	mol%	% ponderado	wt %	mol%	wt %	mol%	mol%	% ponderado	wt %	mol%	% ponderado		
Fm. Petaca	ARENISCA	2,9	0,02844	9,18	14,51	0,25874	0,13	0,0021	0,26083	84,20	1,93	0,02049	6,61	100	9

*CIA (Chemical Index of Alteration) calculado con los porcentajes molares (%mol) de Al₂O₃, CaO, Na₂O y K₂O de acuerdo a *Nesbitt and Young* (1982).

$$CIA = \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right) * 100$$

Anexo 3

Tabla A3 Cálculo de las relaciones Nb/Y vs Zr/Ti, Zr/Sc vs Th/Sc y La/Sc vs Ti/Zr

Formation/sample	Sample	Lithotype	Zr	Y	Nb	TiO2	Ti	Nb/Y	Zr/Ti
Formacion Petaca			ppm	ppm	ppm	wt %	ppm	x	y
Fm. Petaca	HSR-X12D	Arenisca	112,7	15,8	2,1	0,09	540	0,1329	0,2087

Formation/sample	Sample	Lithotype	Zr	Sc	Th	Zr/Sc	Th/Sc
			ppm	ppm	ppm	x	y
Fm. Petaca	GP3	arenite	112,7	3	2	37,5667	0,6667

Formation/sample	Sample	Zr	TiO2	Ti	Sc	La	La/Sc	Ti/Zr
Formacion Petaca		ppm	wt %	ppm	ppm	ppm	x	y
Fm. Petaca	arenite	112,7	0,09	540	3	16,8	5,6000	4,7915

*Ti Calculado a partir de TiO₂ de la siguiente forma: $Ti(ppm) = TiO_2(wt\%) * \frac{48}{80} * 100$.

Correos:

- nickson619@gmail.com
- rodopet_123@hotmail.com.ar

Celular:

- 72025376
- 74968176