



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

“Relaciones Estratigráficas de la Formación La Joya (Jurásico Medio-Superior) en el Área de La Ballena, Zacatecas”.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Marisol Guadalupe Ruiz Avendaño

Alumna becada por CONACyT

Clave: 1009058

Asesor:

Dr. José Rafael Barboza Gudiño

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero/2022





FACULTAD DE
INGENIERÍA

21 de octubre de 2021

**ING. MARISOL GUADALUPE RUIZ AVENDAÑO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. José Rafael Barboza Gudiño** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 21 de octubre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Relaciones Estratigráficas de la Formación La Joya (Jurásico Medio-Superior) en el Área de La Ballena, Zacatecas"

Introducción.

1. Estratigrafía del Área de Estudio
2. Detalle Geológico-Estructural del Área de Estudio
3. Petrografía de la Secuencia Siliciclástica del Área
4. Geoquímica de Circones de la Formación La Joya
5. Geocronología de Circones de la Formación La Joya

Discusión.

Conclusiones.

Referencias.

Anexos.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ SALVÁN
DIRECTOR.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Hiriart
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 836 2330 a 239
fax (444) 836 2330

Agradecimientos

A mi familia por creer siempre en mí, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y por sobrellevar la situación en la que nos ha puesto la vida con tal de verme cumplir mis metas.

A mi asesor de tesis, el Dr. José Rafael Barboza Gudiño por su apoyo y conocimiento compartido para el desarrollo de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme apoyado con la beca para los estudios de mi posgrado. (Clave:1009058).

Al Instituto de Geología de la UASLP por permitirme desarrollar mis estudios de investigación en sus laboratorios.

Al proyecto FAI, Sedimentación en un talud continental del Triásico Superior-Jurásico en los estados de San Luis Potosí y Coahuila, convenio C20-FAI-10-07-07 (Asignado por la Secretaría de Investigación y Posgrado de la UASLP). Responsable Técnico: José Rafael Barboza Gudiño.

Al Ing. Erasmo Mata Martínez por su apoyo brindado para la realización de las láminas delgadas que se describen en este trabajo.

A los Drs. Rubén A. López Doncel y Ramón Torres Hernández por su constante apoyo y asesorías en las evaluaciones de este trabajo.

A mis compañeras Mariana Coutiño y Nayeli Lupercio por creer, motivar y animar en los momentos más cruciales.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN/ ABSTRACT.....	1
Introducción.....	1
Antecedentes.....	2
Localización del área de estudio.....	4
Fisiografía	5
Planteamiento del problema.....	6
Justificación.....	6
Hipótesis.....	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	7
Metodología.....	7
Geología Regional.....	9
1.-Estratigrafía del Área de Estudio	12
2.-Detalle Geológico-Estructural del Área de Estudio.....	19
3.-Petrografía de la Secuencia Siliciclástica del Área.....	31
4.-Geoquímica de Circones de la Formación La Joya.....	51
5.-Geocronología de Circones de la Formación La Joya.....	57
Discusión.....	61
Conclusiones.....	61
Referencias.....	63
Anexos	65

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa con la localización del área de estudio, arriba se muestra el mapa imagen de satélite del área y abajo las vías de acceso, en azul se muestra la ruta propuesta por el navegador, el cual propone un tiempo estimado de una hora con 52 minutos hasta el sitio.
- Figura 2. Mapa de provincias fisiográficas de México, señalando el área de estudio (círculo azul) que pertenece a la provincia indicada con el número 9, Mesa del Centro.
- Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo.
- Figura 4. Provincias geológicas de Ortega-Gutiérrez *et al.* 1991.
- Figura 5. Provincias paleogeográficas y ubicación de las áreas con afloramientos del Triásico marino en el centro de México. Tomada de Barajas-Nigoche, 2008.
- Figura 6. Columna estratigráfica general del área.
- Figura 7. Columna estratigráfica de Cerro Grande, La Ballena, Zacatecas, ubicando a la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior en el tiempo geológico.
- Figura 8. Vista panorámica del cerro Grande, Sierra de Salinas, cerca de la localidad La Ballena, Zacatecas.
- Figura 9. Recorrido de campo en Cerro Grande, Sierra de Salinas, Zacatecas con los puntos de los afloramientos de las unidades reconocidas y su acomodo con respecto a la falla.
- Figura 10. Intercalación de pizarras y limolitas o areniscas de grano fino de la Formación Zacatecas, a la izquierda pueden observarse las capas ligeramente plegadas y a la derecha los planos de foliación de las mismas.
- Figura 11. Rocas andesíticas con pseudoestratificación y clivaje de la Formación Nazas.
- Figura 12. Conglomerado-brecha con presencia de intemperismo y alteraciones de óxidos en contacto con areniscas de grano fino a medio hacia la cima (parte de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior).
- Figura 13. A la izquierda se muestran areniscas con presencia de diaclasas y a la derecha un banco de conglomerado compuesto por clastos de andesitas de coloración púrpura a negro.
- Figura 14. Capas plegadas con presencia de intemperismo de la Formación Zacatecas.
- Figura 15. Falla normal que desplaza las unidades jurásicas en la ladera derecha de Cerro Grande (viendo hacia el N-NE).
- Figura 16. Rocas de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, intercalación de conglomerados, limolita-lutita y areniscas de grano medio.
- Figura 17. Clivaje subparalelo a la estratificación de los conglomerados de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior.
- Figura 18. A la izquierda contacto entre conglomerado volcánico (arriba) y areniscas (abajo), a la derecha, conglomerado con fragmentos volcánicos.
- Figura 19. Columna estratigráfica representativa de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, la escala es un aproximado de lo medido en campo, que corresponde a ± 100 m de la unidad.
- Figura 20. Mapa geológico del área La Ballena, Zacatecas, modificado de Barajas-Nigoche, 2008.
- Figura 21. A la izquierda se encuentra representada la disposición de los estratos de lo que viene siendo la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, y a la derecha los datos estructurales tomados en la Formación Zacatecas.
- Figura 22. Representación gráfica del desplazamiento de los estratos que provocó la falla normal entre las rocas de las unidades presentes en Cerro Grande, La Ballena.
- Figura 23. Lámina LB-06-1: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 24. Lámina LB-09-3: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 10x.
- Figura 25. Lámina LB-09-31: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 26. Lámina LBA-20-4: Litofeldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

- Figura 27. Lámina LBA-20-4b: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 28. Lámina LBA-20-4b1: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 29. Lámina LBA-20-5: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 30. Lámina LBA-21-1: NOMBRE, con luz polarizada, objetivo 10x.
- Figura 31. Lámina LBA-21-2 con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 32. Lámina LBA-21-5 con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 33. Lámina 06-2: Cuarzo-feldespática, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 34. Lámina LBA-21-3 con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 35. Lámina LBA-21-4 con luz polarizada, objetivo 5x, en la imagen inferior se muestra un circón.
- Figura 36. Lámina LBA-13-7. Arenisca cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 37. Lámina LBA-20-7: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x
- Figura 38. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para los clastos volcánicos de la muestra LB-13-18. B: Lámina LB-13-18: Brecha volcánica, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 39. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca LBA-20-5b. B: Lámina LBA-20-5b con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 40. Lámina LBA-20-6 volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 41. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca PB1.5. B: Lámina PB1.5: Roca volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 10x.
- Figura 42. A: Diagrama de clasificación de los componentes volcánicos para la roca PB-1.4. B: Lámina PB-1.4. Roca volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 43. Lámina LBA-13-13: Roca sedimentaria clasto-carbonatada?, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 44. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca LBA-20-2. B: Lámina LBA-20-2, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 45. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB-1.6. B: Lámina PB-1.6: Basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 10x. C: Lámina PB-1.6: Basalto/andesita, con luz natural, objetivo 5x.
- Figura 46. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca L13-06-1. B: Lámina L13-06-1: Riolita, con luz polarizada, objetivo 5x. C: Lámina L13-06-1: Riolita, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 47. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3C. B: Lámina PB1.3C: Roca ígnea con alto contenido de cuarzo, con luz polarizada, objetivo 10x.
- Figura 48. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3C. B: Lámina PB-TR-N: Gabro?, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 49. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3d. B: Lámina PB1.3d: Basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 50. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3d (intrusión). B: Lámina P-B1.3d (intrusión), basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 51. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca L-BA-08-1. B: Lámina L-BA-08-1. Riolita?, con luz polarizada, objetivo 5x.
- Figura 52. Lámina VAR-07-20: Ceniza volcánica?, (A) luz polarizada y (B) luz natural, objetivo 10x.
- Figura 53. Diagrama de clasificación para las 15 láminas descritas como areniscas agrupadas en petrofacies.
- Figura 54. Diagrama de discriminación de ambientes de procedencia para las areniscas del área de estudio.
- Figura 55. Diagrama de dispersión U/Yb vs Hf (ppm) propuesto por Grimes *et al.* (2007; 2015).
- Figura 56. Diagrama de dispersión U/Yb vs Nb/Yb de los circones de la muestra LBA-16-7. (Grimes *et al.* 2015).

- Figura 57. Diagrama de la relación Th/U versus edades (Ma) por el método U-P en circones de La Ballena, Zacatecas. (Wang, 2018).
- Figura 58. Diagrama de tierras raras de circones de la muestra LBA-16-7 con valores normalizados a condrita (CI) de Sun y McDonough (1995).
- Figura 59. Histograma y curva de probabilidad relativa de los circones de la muestra LBA-16-7.
- Figura 60. Diagrama de concordia tipo Wetherill para los circones de la muestra LBA-16-7.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. La tabla muestra los resultados sobresalientes de algunos de los trabajos consultados para conocer la metodología empleada en éstos y de acuerdo con ellos, ver los resultados a los que se pueden llegar.
- Tabla 2. Concentraciones en partes por millón (ppm) de elementos traza en circones de la muestra LBA-16-7.
- Tabla 3. Concentración en ppm de REE en circones de la muestra LBA-16-7 normalizados a condrita (CI) de Sun y McDonough (1995). LREE= Sumatoria total de tierras raras ligeras; HREE= Sumatoria total de tierras raras pesadas; TREE= Sumatoria total de elementos de REE; $Eu/Eu^* = Eu / [(SmCI) * (GdCI)]^{1/2}$.
- Tabla 4. Resultados de la geocronología U-Pb de circones detríticos de la muestra LBA-16-7 del área La Ballena, Zacatecas.
- Tabla 5. Probable procedencia de circones detríticos de la muestra LBA-16-7 de unidad siliciclástica de La Ballena, Zacatecas. Modificado de Pérez-Casillas (2018).

RESUMEN

El presente trabajo ha tenido como objetivo definir e interpretar las unidades jurásicas de la sucesión de rocas expuestas en el área de La Ballena, Sierra de Salinas, Zacatecas para determinar si, parte de esta corresponde a la Formación La Joya en una facies diferente o a otra unidad; teniendo en cuenta los resultados de análisis geocronológicos recientes, los cuales arrojan edades más jóvenes que las previamente consideradas y que estuvieron basadas en las edades confirmadas para esta formación en otras localidades a nivel regional. Esto se investigó a través de la geocronología de circones detríticos que permitió generar un registro detallado y más completo de la estratigrafía en el área de estudio. Con base a los trabajos de campo y analíticos realizados, se delimitó una unidad siliciclástica en la parte superior de la Formación La Joya en sentido estricto, siendo la edad de tal unidad siliciclástica de aparente distribución local, comparable a la de la parte inferior de la caliza Zuloaga; por lo anterior, se optó por cartografiarla localmente como unidad siliciclástica superior.

Palabras clave. Formación La Joya, Sierra de Salinas, facies, geocronología, estratigrafía.

ABSTRACT

The present work aims to define and interpret the jurassic units of the succession of rocks outcropping in the area of La Ballena, Zacatecas to determine if part of this rocks corresponds to the La Joya Formation in a different facies or to another unit; taking into account the results of recent geochronology studies, wich show different ages to those previously considered, based on confirmed ages for the premusible same unit in other localities in the region. This is to be achieved throught the geochronology of detrital zircons wich will allow generating a detailed and more complete record of the stratigraphy in the study area. Based on the field and analytical work, a siliciclastic unit was delimited in the upper part of La Joya Formation in a strict sense, the age of such silicilastic unit of apparent local distribution being comparable to the lower part of the Zuloaga limestone.; therefore, it was decided to map it locally as an upper siliciclastic unit.

Keywords. La Joya Formation, Sierra de Salinas, facies, geochronology, stratigraphy.

INTRODUCCIÓN

La Formación La Joya ha sido descrita en diferentes localidades del centro y noreste de México, el espesor de ésta varía desde algunos centímetros hasta alrededor de 600 m, y es descrita como una secuencia grano-decreciente compuesta de conglomerado-brecha y capas rojas. La base de la Formación consiste en conglomerados polimícticos, los componentes se derivaron de rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas, así como sedimentarias (Barboza-Gudiño, 2012); la parte media, está compuesta por areniscas de grano fino a grano medio, mientras que la parte superior está compuesta por limolitas. En general, la Formación La Joya, representa un cambio ambiental de terrestre a marino; lo que sugiere que se encuentra en un ambiente de depósito transicional.

Los depósitos en ambientes sedimentarios pueden clasificarse como continentales, marinos o mixtos (transicionales). Existen varios factores que intervienen para construir un ambiente sedimentario, entre los que se incluyen el sistema climático, las formas del relieve, en donde se toman en cuenta la localización geográfica, los procesos tectónicos, los agentes de transporte, procesos orgánicos y organismos que modifican los sedimentos, la profundidad del agua, el tamaño de los granos, entre otros. Un ambiente sedimentario se caracteriza por un conjunto de condiciones ambientales y procesos geológicos los cuales determinan el tipo de sedimento depositado y en su caso, tipo de fósiles y otras estructuras sedimentarias con potencialidad de preservarse. Entre las relaciones generales que existen entre ambiente y tipo de depósito se encuentran el tipo de área fuente, el tamaño y redondez-angulosidad de los granos, la selección de éstos, la energía y el flujo.

Como parte importante también para la caracterización de un depósito sedimentario, se considera la identificación de facies sedimentarias presentes. Las facies sedimentarias son el resultado de la acumulación de partículas erosionadas de rocas más antiguas y transportadas al sitio deposicional;

además de clásticas, pueden ser biogénicas que representan acumulaciones de conchas enteras o fragmentadas y otras partes duras de organismos; o químicas que representa la precipitación inorgánica del material de la solución. Cada facies tiene una configuración tridimensional y puede cambiar su posición con el tiempo, esto dependerá de los cambios de los aportes, la subsidencia, el nivel del mar, entre otros factores. Al describir las características físicas de las facies que pueden reconocerse, es decir, las litológicas, se denominan litofacies; mientras que al tomar en cuenta los atributos biológicos o en este caso paleontológicos, se definen biofacies a través de la descripción de fósiles, (Reguant, 1971). Estas descripciones ayudan a definir la historia deposicional en el área, y también permiten relacionar las diferentes asociaciones de facies y posteriormente poder compararlas para definir correlaciones estratigráficas.

Como parte del trabajo realizado por Barboza-Gudiño (2010), se caracteriza a las rocas triásicas de la localidad La Ballena como una sucesión de litofacies asociadas a facies de abanicos con buenos desarrollos en las facies correspondientes a márgenes de canal, lóbulos “suprafan” y ambientes de canal. Estas rocas son sobreyacidas por una sucesión volcanogénica de flujos de lavas de composición intermedia y rocas piroclásticas de composición félsica con edades del Jurásico Temprano a Medio. A su vez, estas rocas son sobreyacidas de manera discordante por los conglomerados y brechas previamente descritos como Formación La Joya que gradúan hacia arriba a areniscas.

Antecedentes

Mixon *et al.* (1959) describen y nombran por primera vez a la Formación La Joya, incluyéndola dentro del Grupo Huizachal; proponiendo su localidad tipo en el lado norte del Valle del Huizachal, en el poblado de La Joya, camino Victoria-Jaumaue. La describen litológicamente como una unidad que comprende de base a cima: conglomerado basal (de composición, tamaño de grano y espesores variables), caliza y conglomerado de caliza (caliza cristalina roja a gris alternando con caliza gris laminada y material arcilloso rojo y caliza fragmentada), limolitas, mudstone rojo y arenisca cuarzosa; arenisca cuarzosa y conglomerado de estratificación cruzada de coloración roja-rosa. Carrillo-Bravo (1961), utiliza el nombre de La Joya, pero mantiene el nombre de Formación Huizachal para la que Mixon *op cit* propuso el nombre de La Boca; describe que además el conglomerado basal propuesto por este último se presenta mal clasificado, formado por fragmentos de rocas ígneas, metamórficas y de lechos rojos subyacentes. Le asigna una edad más joven que el Triásico Superior y más antigua que el Oxfordiano Superior, esto lo infiere debido a la posición discordante con respecto a las capas consideradas en ese entonces como réticas altamente plegadas e intrusionadas de la Formación Huizachal; así como una supuesta discordancia con respecto a la Formación Zuloaga. Posterior a este trabajo, PEMEX (1988), indican que por su posición estratigráfica con respecto a la Fm. Zuloaga del Oxfordiano y por la fauna encontrada, la Formación La Joya se ubica en el Calloviano y definen su ambiente de depósito como parte de una facies continental lacustre.

En 1992, Götte y Michalzik consideran a la Formación La Joya, como la unidad base del Grupo Zuloaga, junto con las formaciones Novillo, Minas Viejas y Zuloaga; proponiendo así, la pertenencia de la Formación a un grupo diferente y no como originalmente se había considerado. Un par de años después, Silva-Romo (1994), realiza su trabajo de tesis de maestría sobre la Sierra de Salinas con el objetivo principal de establecer las relaciones estratigráficas y estructurales de la secuencia pre-Jurásica tardía y así mismo, proponer un modelo de evolución paleoambiental. En el trabajo subdivide a la Sierra en cuatro sectores: I-Cerro Alto, II-Cerro La Peña, III-La Ballena y IV-Villa Hidalgo, en los que está comprendida el área de estudio de este trabajo en la cual reconoció que ocurrieron cuatro fases de deformación, dos compresivas y dos distensivas, apoyándose con la manifestación de pliegues, cabalgaduras y desarrollo de foliación, fallas inversas, fallas normales y fracturamiento, respectivamente para cada evento. El mismo autor y colaboradores, en el 2000, trabajaron con otro análisis estratigráfico y estructural para correlacionar las secuencias depositadas en algunas

localidades de la Mesa Central, al este de Zacatecas, en donde están incluidas las formaciones La Ballena, Taray y Zacatecas y una unidad continental probablemente del Jurásico Medio, trabajo en el que definen el modelo de un abanico submarino como ambiente de depósito para las secuencias de las localidades de estudio; el cual se desarrolló en el margen continental de Pangea durante el Triásico. Reportaron que las asociaciones registradas de turbiditas para las zonas de la Ballena y Zacatecas corresponden a la parte media del abanico y quizá también de la parte externa del mismo. Tiempo después, Barboza-Gudiño *et al.* (2004) ubican a la Fm. La Joya para el área de Real de Catorce en el Jurásico Medio-Oxfordiano, con base en su posición estratigráfica; mismos que definen que su depósito es de rellenos aluviales que varían desde abanicos hasta planicies aluviales y posiblemente depósitos lagunares y marinos someros hacia la cima, teniendo un aporte más amplio y detallado respecto a su ambiente de depósito.

Entre los últimos y más recientes trabajos que consideran a la Formación La Joya, está el de Marc Wengler (2014), quién tenía como objetivo identificar la relación y diferencias entre las áreas La Ballena, Charcas y Real de Catorce, así como un estudio de procedencia de las capas rojas del Jurásico en el noreste de México. El análisis determinó que los fragmentos volcánicos de los sedimentos han sido asignados a una edad Jurásica, pertenecientes a la Formación Nazas; sin embargo, los sedimentos sin fragmentos volcánicos son más representativos del Triásico Superior o del Jurásico Inferior. Con las observaciones hechas y con el apoyo de estudios geocronológicos U-Pb en circones, determinó que los sedimentos sin fragmentos volcánicos predominantemente arrojan edades del Triásico Superior y los sedimentos con fragmentos volcánicos, arrojan edades del Jurásico Inferior al Medio como edades máximas de depósito; lo cual indica que la Formación La Joya, se expande posiblemente hasta el Pliensbachiano y quizá sea mucho más joven que lo que la han reportado estudios previos. Otro de los más recientes trabajos es el de Loyola-Martínez (2015) que hizo estudios palinológicos, de isótopos estables y sedimentológicos para la reconstrucción paleo-climática de la Mesa Central de México y sus estribaciones con la Sierra Madre Oriental durante el Jurásico Inferior a Medio; estudio para el cuál recolectó muestras de la localidad La Ballena, Zacatecas, Real de Catorce e Iturbide. En 2018, Pérez-Casillas reporta con base a estudios geocronológicos, una edad máxima de depósito para la Formación, del Jurásico Medio (166 y 167 Ma, Bathoniano) en la Sierra de Catorce.

Trabajos previos y sus metodologías.

Dentro de los trabajos previos que existen y son afines a la zona de estudio mencionada, ya sea por localidad, metodología o como parte de la columna estratigráfica a la que pertenecen las rocas en estudio, incluyen en su mayoría, análisis de relaciones estratigráficas y descripción de unidades para definir a la Formación La Joya u otras unidades y la edad a la que corresponden de acuerdo con su posición estratigráfica. Como puede observarse en la tabla 1, no hay tantos estudios actualizados que incluyan fechamientos de las rocas de interés dentro de sus investigaciones.

Tabla 1. La tabla muestra los resultados sobresalientes de algunos de los trabajos consultados para conocer la metodología empleada en éstos y de acuerdo con ellos, ver los resultados a los que se pueden llegar.

MÉTODOS Y MATERIAL DE TRABAJO				
Autor	Año	Trabajo	Métodos	Materiales de trabajo
Silva-Romo	1994	Estudio de Estratigrafía y Estructuras Tectónicas de la Sierra de Salinas, Edos. de S.L.P. y Zac.	Fotogeología, cartografía, análisis estructural, análisis estadísticos, petrografía, micropaleontología y análisis químicos de elementos mayores.	Cartas geológicas, secciones geológicas, datos estructurales, láminas delgadas de areniscas, rocas ígneas (granitos e ignimbrita) de la Sierra de Salinas.
Silva-Romo <i>et al.</i>	2000	A submarine fan in the Mesa Central, Mexico.	Sedimentología, Procedencia.	Análisis composicional de areniscas de las formaciones La Ballena, Taray, y Zacatecas.

Bartolini <i>et al.</i>	2001	The Triassic Zacatecas Formation in Central Mexico: Paleotectonic, Paleogeographic, and Paleogeographic Implications.	Relaciones estratigráficas, ambientes deposicionales, análisis de facies, distribución de faunas y configuraciones tectónicas.	Rocas turbidíticas de la Formación Zacatecas.
Barboza-Gudiño <i>et al.</i>	2004	Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.	Cartografía, estratigrafía, estructural, petrografía, geoquímica, sedimentología y geocronología (U-Pb en circones, en LA-MC-ICPMS).	Cartas geológicas, datos estructurales, perfiles estratigráficos, rocas de las formaciones Zacatecas, Cerro El Mazo, Nazas, La Joya, Zuloaga, La Caja, Taraises, Tamaulipas Inferior, Otates, Tamaulipas Superior, Cuesta del Cura, Indidura y Caracol.
Barboza-Gudiño <i>et al.</i>	2010	Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern Mexico: Tectonic setting and provenance.	Configuraciones tectónicas, geocronología (U-Pb en circones, en LA-MC-ICPMS), procedencia.	Areniscas y rocas volcánicas de Charcas, Real de Catorce, San Marcos y El Cañón La Boca, diagramas de elementos REE y de procedencia.
Rubio-Cisneros, Lawton.	2011	Detrital zircon U-Pb ages of sandstones in continental red-beds at Valle de Huizachal, Tamaulipas, NE Mexico: Record of Early-Middle Jurassic arc volcanism and transition to cristal extensión.	Trituración y separación de circones, análisis isotópicos, LA-MC-ICP-MS	Areniscas del Valle de Huizachal de las formaciones La Joya y La Boca.
Rubio-Cisneros, <i>et al.</i>	2011	Análisis preliminar de procedencia de rocas clásticas jurásicas del valle de Huizachal, Sierra Madre Oriental: Influencia del vulcanismo sinsedimentario y el basamento cristalino	Sedimentología, análisis petrográfico: conteo (Gazzi-Dickinson).	Perfiles estratigráficos, areniscas de la Fm. La Boca y Fm. La Joya, diagramas ternarios de clasificación y procedencia.
Zavala-Monsiváis <i>et al.</i>	2011	The Jurassic volcanic succession in the Charcas area, San Luis Potosí: a contribution to the understanding of the Nazas arc in northeastern Mexico.	Estratigrafía, petrografía, geoquímica (elementos mayores por XRF y traza por ICP-MS), geocronología (U-Pb en circones, por ablación láser LA-MC-ICP-MS).	Rocas de la sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, S.L.P., diagramas de clasificación y multielementos.
Wengler	2014	Provenance analysis of Triassic and Jurassic sediments in NE Mexico.	Geocronología (U-Pb en circones).	Rocas de la secuencia Triásica y Jurásica de La Ballena Zac., Charcas, S.L.P. y Real de Catorce, S.L.P., diagramas de procedencia y edades máximas.
Wengler <i>et al.</i>	2019	Sediment provenance of Triassic and Jurassic sandstones in central Mexico during activity of the Nazas volcanic arc.	Petrografía, geoquímica (elementos mayores y traza por XRF, minerales pesados), geocronología (U-Pb en circones) con catodoluminiscencia (LA-ICP-MS), estimación de densidad de Kernel.	Láminas delgadas, diagramas de clasificación litológica, de procedencia, de concordia, de minerales pesados e histogramas de Kernel de areniscas de las formaciones Zacatecas, Nazas y La Joya.

Para más información de acuerdo con los trabajos consultados, revisar anexos.

Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la comunidad La Ballena, parte de la Sierra de Salinas, en los límites de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas (figura 1).

Para el acceso a la comunidad, puede tomarse la carretera 49 (San Luis-Zacatecas), tomando la desviación hacia Pinos, Zac. y continuar hasta Villa Hidalgo, Zac. en donde puede tomarse el camino hasta el poblado de La Ballena.



Figura 1. Mapa con la localización del área de estudio, arriba se muestra el mapa imagen de satélite del área y abajo las vías de acceso, en azul se muestra la ruta propuesta por el navegador, el cual propone un tiempo estimado de 1 hora con 52 minutos hasta el sitio.

Fisiografía

Se encuentra en la parte nororiental de la provincia fisiográfica conocida como Mesa Central (figura 2), la cual es una extensa altiplanicie con una superficie inclinada de Sur a Norte, sobre la cual se asientan montañas aisladas y conjuntos de estas, constituidos por rocas volcánicas cenozoicas, así como serranías que alcanzan alturas de hasta más de 3000 m.s.n.m además son comunes las mesas y remanentes de rocas volcánicas principalmente del Neógeno y Cuaternario, así como los depósitos de pie de monte y algunos afloramientos aislados de rocas metamórficas. La morfología actual en la porción centro-oriental de la Mesa Central, está representada por extensas planicies interrumpidas por los aislados lomeríos alineados que corresponden generalmente con estructuras constituidas por rocas mesozoicas que guardan una orientación NW-SE, en tanto que hacia el occidente se hacen presentes mayores elevaciones, predominando las geoformas producto de la erosión diferencial de los derrames ígneos, como son amplias mesetas y picachos aislados.



Figura 2. Mapa de provincias fisiográficas de México, señalando el área de estudio (círculo azul) que pertenece a la provincia indicada con el número 9, Mesa del Centro.

Las rocas más antiguas que afloran en la Mesa Central son facies marinas de edad triásica y delimitan burdamente la zona del margen continental para ese tiempo. Yaciendo sobre esas rocas aparecen distribuidas en toda la Mesa Central rocas continentales de edad jurásica. A partir del Oxfordiano y hasta finales del Cretácico prevalecieron condiciones marinas. (Nieto-Samaniego, 2005).

Planteamiento del Problema

Rocas de Cerro Grande, La Ballena, Zac., han sido definidas como parte de la Formación La Joya, sin embargo, recientemente han sido localizadas unas unidades clásticas que arrojan edades más jóvenes a las ya reportadas para esta Formación.

Justificación

La edad relativamente más joven de las litofacies reconocidas como Formación La Joya en el área de estudio, pueden dar la pauta para establecer un posible diacronismo de la unidad y correlaciones estratigráficas con implicaciones paleogeográficas y tectónicas.

Hipótesis

Hasta el momento, se pensaba que las rocas siliciclásticas que en la localidad La Ballena sobreyacen a las unidades Zacatecas y Nazas, pertenecían a la Formación La Joya, sin embargo, con los fechamientos que se han hecho recientemente, las edades por lo menos de una parte de esta unidad resultan demasiado jóvenes, por lo que es posible pensar que estas rocas no pertenezcan a la Fm. La Joya o, sean parte de alguna facies de ésta misma, la cual en este caso presentaría un diacronismo importante.

Objetivo general

Definir e interpretar la sucesión de rocas jurásicas expuestas en el área de estudio para determinar si, posiblemente correspondan en parte a la Formación La Joya en una facies diferente de esta o a otra unidad; teniendo en cuenta los análisis geocronológicos (los cuales arrojan edades diferentes a las ya conocidas de otras áreas).

Objetivos específicos

- Descripción petrográfica a través de láminas delgadas para definir y corroborar el tipo de rocas presentes en el área.
- Descripción geoquímica a través de análisis de elementos traza y tierras raras para definir procedencia y ambiente geotectónico de las rocas.
- Determinación geocronológica, con datos de análisis de U-Pb con los que ya se cuentan.
- Descripción estratigráfica y estructural para conocer la relación que presentan las formaciones aledañas a la Formación La Joya.
- Determinar a través de un conjunto de interpretaciones si las rocas, o por lo menos parte de esta secuencia, corresponden en edad con la Formación La Joya.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo de tesis que se basó en una investigación mixta, debido a que considera elementos históricos, descriptivos, explicativos, cualitativos y cuantitativos, se planteó una metodología dividida en 4 etapas principalmente (figura 3). La elección de esta división obedece a la conjunción de la similitud general de los procesos y el orden en el que se llevaron a cabo.

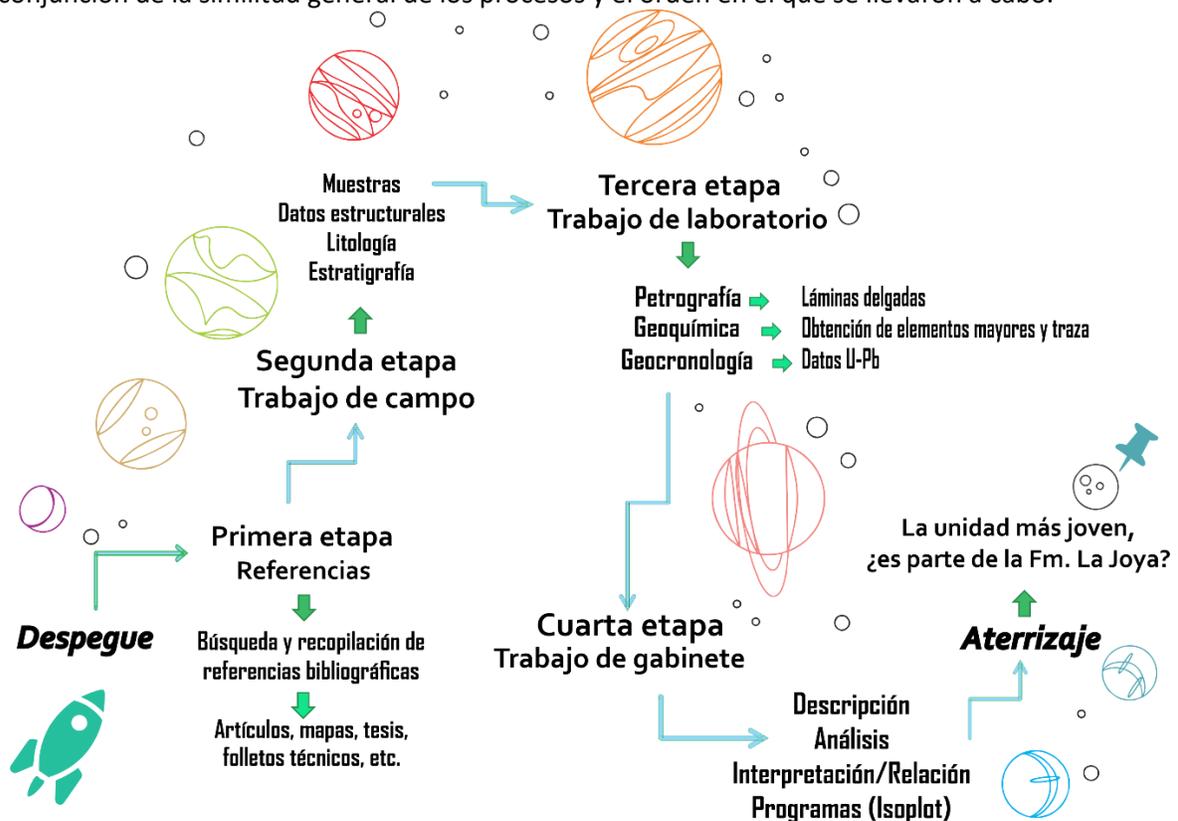


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo.

I.- La primera etapa consistió en la búsqueda, recopilación y revisión bibliográfica referente a la Formación La Joya, enfocándose principalmente en los trabajos geocronológicos previos; así como en su ambiente de depósito y generalidades del área de estudio para tener una visión detallada de lo que se conoce hasta ahora y los sitios en donde hay carencia de información.

II.- La segunda etapa es lo que respecta al trabajo de campo, el cuál consistió en salidas al área de estudio (Cerro Grande, La Ballena, Zacatecas) para la recolección de muestras de mano, la cual se

hizo bajo los criterios aprendidos en los cursos escolares que constan de, elegir una muestra fresca o “sana”, es decir que no tenga alteraciones, libres de oxidación, etc., que no estén en contacto con agua de arroyos o mares, que el fracturamiento o la presencia de vetillas sean nulos o bajos en la roca y que no se encuentren sobre planos donde pudieron haberse transformado los minerales primarios; la toma de datos estructurales, los cuales se adquieren con la ayuda de una brújula Brunton generalmente, pero para este trabajo se utilizó también una brújula de tipo Freiburger o Clark, la cual usa el sistema de “círculo completo” y mide rumbos e inclinación en una sola acción, los datos litológicos y estratigráficos, en los que se hace la descripción detallada del afloramiento empezando por tomar las coordenadas del sitio para marcarlas en el mapa, describir las estructuras, texturas, mineralogía y clasificación de las rocas. Todo esto con el fin de determinar la petrología de las rocas, petrografía y otros estudios (como los geoquímicos o geocronológicos), así como la realización de columnas estratigráficas que nos indicaron los probables ambientes de depósito y procedencia de las rocas, que sirvieron para tener un análisis completo y detallado de la formación en estudio.

III.- La tercera etapa corresponde al trabajo hecho en laboratorios, como se mencionó, esta etapa se realizó con la ayuda de las muestras obtenidas en la etapa anterior y para objetivos del estudio se realizaron 3 laboratorios diferentes que corresponden a: A) Obtención de láminas delgadas para el estudio petrográfico, B) Obtención de elementos traza y tierras raras en circones, y C) Obtención de datos geocronológicos y que se describen a continuación:

A) Obtención de láminas delgadas para el estudio petrográfico.

Las láminas delgadas se elaboraron en el laboratorio de laminación del Instituto de Geología de la UASLP. El protocolo que se empleó para su obtención fue el siguiente:

Se seleccionó la orientación en la que se hizo el corte de las rocas, por lo general, los cortes se realizan perpendicularmente a la estratificación, lo cual permite realizar un mejor estudio petrográfico y estratigráfico. El corte de las muestras se efectuó con una cortadora de sierra manual marca Hillquist con disco de diamante.

El proceso para la obtención de las láminas delgadas inició con el corte de las muestras en el tamaño necesario para ser soportadas en un portaobjeto previamente esmerilado (vidrio) cuyas dimensiones aproximadas son a 4.6 x 2.7cm. Una vez obtenidos los cubos, se procedió a pulir la cara de la muestra que se desea ver y una de las caras del portaobjeto donde se pegó la muestra. En el pulido se utilizaron abrasivos del número 200, después del 400, 600 y 800; además de un poco de agua para lubricar las muestras y no rayar la superficie deseada. El procedimiento consistió en frotar la muestra sobre un vidrio grueso, en donde se agregó el abrasivo y un poco de agua; es importante que, por cada número de abrasivo, se utilice un vidrio diferente. Una vez bien pulidas las muestras con el abrasivo 200, se pasó al 400 y así sucesivamente. Al concluir el pulido y tener niveladas las superficies de los cubos, se pegaron a los portaobjetos con una resina epóxica (Hillquist) y con la ayuda de una parrilla de calentamiento para laboratorio se calentaron un poco las muestras para que fuera más fácil la adhesión de la resina; fue necesario haber dejado secar a temperatura ambiente uno o dos días para lograr buenos resultados. Posteriormente, se procedió a desbastar los cubos en una máquina desbastadora manual (Hillquist), hasta que se consiguió el grosor de 0.3 mm aproximadamente, después se pasaron las muestras nuevamente por los abrasivos 400, 600, 800, y finalmente, se pulieron con un disco pulidor (Hillquist) del número 1000 y/o 1200, dando el acabado deseado para su análisis al microscopio.

B) Obtención de elementos traza y REE en circones.

Se analizó previamente la muestra LBA-16-7, a través de una separación de circones de la que se obtuvieron elementos traza y tierras raras (REE), los cuales se presentan en concentraciones menores a 0.1% (equivalente a 1000 ppm), éstos sirvieron como indicadores representativos para procesos

petrológicos ya que poseen propiedades químicas únicas y registran procesos que no se observan con los elementos mayores. Estos elementos se obtuvieron por el método ICP-MS con la digestión que llevan a cabo en el laboratorio de geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP.

Con la obtención de estos datos, se realizaron diagramas y esquemas para conocer la composición y área fuente de las rocas en estudio.

C) Obtención de datos geocronológicos.

Se cuenta con los datos de una muestra, que se obtuvieron junto con los del trabajo de Wengler, 2014, quien realizó la siguiente metodología para obtenerlos:

Wengler utilizó 7 muestras para hacer el análisis geoquímico U-Pb y así obtuvo la geocronología de muestras recolectadas en La Ballena, Charcas y Real de Catorce. Este análisis lo realizó en los laboratorios del GEUS en Copenhague, en donde emplearon un sistema de ablación laser Nd: YAG (LA) New Wave de 213 nm acoplado a un elemento científico Thermo- Fisher 2 SF-ICO-MS. Para eliminar la contaminación del plomo en la superficie, el contenedor de circón se limpió con un baño ultrasónico antes de colocarlo en la celda de muestra. El análisis emite un láser, al que se le configuró una frecuencia de 10 Hz y una fluidez de 10 J/ cm²; durante la medición, se adaptaron los dos estándares diferentes utilizados (de circón GJ1 y el Plesovice), cada 10 circones medidos. Los datos obtenidos fueron a través de análisis de "punto único", el tiempo total para cada medición fue de 80 segundos (30s de inicio, 30s de ablación y 20s de lavado). El instrumento fue sintonizado para lograr señales grandes y estables para los picos de 206Pb y 238U, y bajas tasas de producción de óxido (<0.8%). Se midieron los siguientes isótopos: 202Hg, 204 (Pb+Hg), 206Pb, 207Pb, 208Pb, 232Th y 238U. La obtención de los datos finales se llevó a cabo a través del software Lolite utilizando el integrado DRS VizualAge.

IV.- La cuarta y última etapa corresponde al trabajo de gabinete, el cual consistió en la descripción, análisis e interpretación final de los resultados obtenidos en las etapas antes mencionados para lograr el objetivo principal de este trabajo.

Como parte de esta etapa, dentro de los métodos que se utilizaron para graficar datos, se encuentra el programa IsoplotR, el cual sirvió de apoyo para hacer diagramas de concordia y probabilidad relativa para obtener una posible edad máxima de depósito y las principales poblaciones de circones que esencialmente nos indican procedencias. El software es gratuito y se basa en bases libres e independientes que se adhieren a los estándares internacionales, existe desde hace varias décadas y continúa creciendo en popularidad; actualmente incluye funciones para U-Pb, Pb-Pb, 40Ar/39Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, Re-Os, U Th-He, traza de fisión y datación por desequilibrio de la serie U. Implementa la regresión isócrona en dos y tres dimensiones, visualiza conjuntos de datos de proporciones múltiples como distribuciones de edad acumuladas, estimaciones de densidad de kernel, gráficos radiales, y calcula las edades medias ponderadas utilizando un criterio de detección de valores atípicos de Chavenet modificado que muestra las incertidumbres analíticas en conjuntos de datos heterocedásticos, Vermeesch (2018).

Geología Regional.

La geología en el área de estudio está caracterizada por presentar rocas volcánicas, sedimentarias o vulcano-sedimentarias de edad Mesozoica pertenecientes a la Mesa Central. La deformación que presentan las rocas mesozoicas expuestas en dicha provincia se ha explicado con base a dos fases de deformación de tipo compresivo. La primera no está claramente establecida, sin embargo, generó metamorfismo en facies de esquisto verde de la secuencia del Triásico Superior; mientras que la segunda ocurrió hacia finales del Cretácico y principios del Terciario. (Silva-Romo, 1994).

De acuerdo con Henry y Aranda (1992), la Mesa Central se encuentra comprendida en la continuación meridional de la provincia "Basin and Range".

En el área de La Ballena, Zacatecas las rocas marinas del Triásico Tardío se han expresado cartográficamente a escala 1:20 000 y 1:25 000, (Chávez-Aguirre, 1968 y Labarthe *et al.* 1982), subsisten interrogantes acerca de la evolución geológica regional.

El área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, en las subprovincias Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

La secuencia mesozoica expuesta en la región está conformada por tres conjuntos de unidades litoestratigráficas separados por discordancias y/o rasgos estructurales. Al conjunto más antiguo, del Triásico Tardío-Jurásico Medio está conformado por las formaciones La Ballena y Nazas. El conjunto medio está conformado por las formaciones Zuloaga y La Caja ambas del Jurásico Tardío. Mientras que el conjunto más joven incluye a las formaciones cretácicas: Taraises, Tamaulipas, Cuesta del Cura, Indidura y Caracol. La secuencia del Jurásico-Cretácico expuesta en la Sierra de Salinas corresponde a las facies internas de la Secuencia de Parras. El Cenozoico está representado por formaciones volcánicas, por un conjunto de granitoides en forma de troncos y diques emplazados en las fallas normales cenozoicas y por unidades sedimentarias continentales.

De acuerdo con la clasificación de las provincias geológicas de México (Ortega-Gutiérrez *et al.* 1993), la zona de estudio se ubica en el Complejo Orogénico Zacatecano, el cual es de origen continental; esta provincia forma la cadena de pliegues y fallas más extensa de México; se ubica en los estados de Durango, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro. Está formada por rocas volcánicas terciarias y sedimentarias del Cretácico subyacidas por rocas vulcano-sedimentarias del Jurásico y Triásico y sedimentarias del Pérmico, presenta pliegues amplios y fallamiento. (Figura 4).

Las rocas del área de estudio sufrieron deformación compresiva durante la Orogenia Laramide; así como levantamiento y fallamiento normal del Terciario, exponiendo las unidades más antiguas de la secuencia, que incluyen sedimentos marinos triásicos y rocas volcánicas del Jurásico (Tristán-González *et al.*, 1995), los cuales subyacen a la secuencia carbonatada cretácica que es característica de la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM), provincia paleogeográfica a la que pertenece la zona de estudio (figura 5). El desarrollo y evolución de la CMCM está representado principalmente por una secuencia de calizas y margas en ocasiones intercaladas con pedernal, junto con los depósitos calcáreos que afloran en la mayor parte del centro del país.

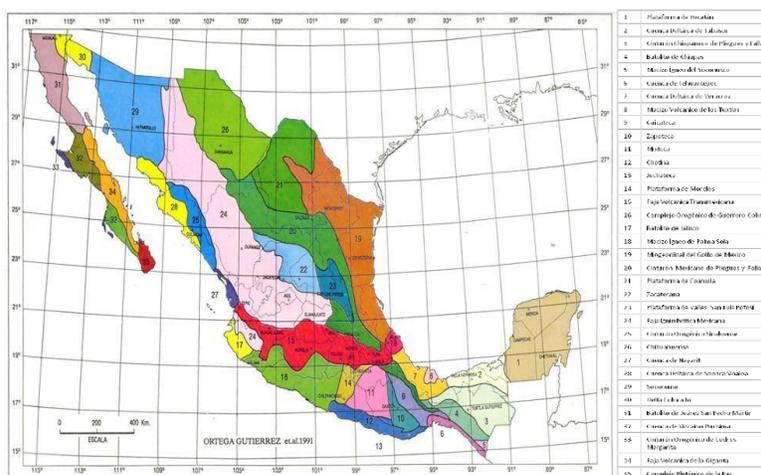


Figura 4. Provincias geológicas de Ortega-Gutiérrez *et al.* 1991.

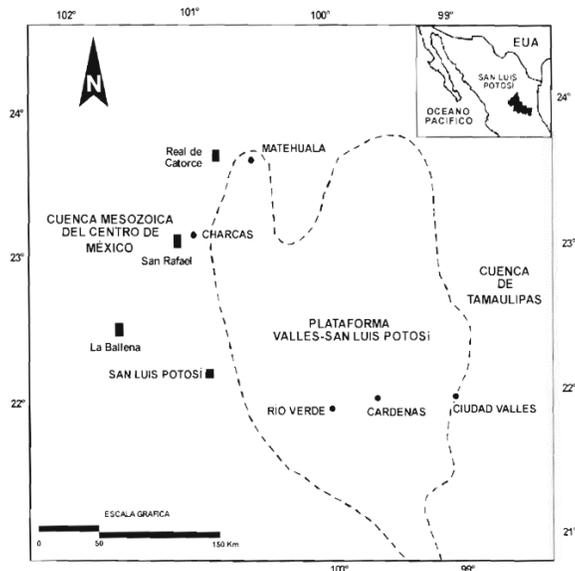


Figura 5. Provincias paleogeográficas y ubicación de las áreas con afloramientos del Triásico marino en el centro de México. Tomada de Barajas-Nigoche, 2008.

La secuencia estratigráfica en el centro y noreste de México está deformada y presenta pliegues con vergencia al N-NE, afectando unidades de edad Cretácico Superior-Terciario Inferior. Posteriormente se estableció un proceso de relajación relacionado con la interrupción del empuje tectónico, formando un sistema de fallas normales orientadas de forma paralela a subparalela a la de los pliegues laramídicos. Este sistema de fallas produjo fosas tectónicas, al tiempo que se daba un volcanismo félsico a intermedio que es considerado perteneciente al sureste de la Sierra Madre Occidental. En las fosas tectónicas (N-S), se depositaron los productos de erosión de las áreas positivas o los mismos productos volcánicos epiclásticos, formando flujos de detritos, depósitos de abanicos aluviales constituidos por algunos conglomerados polimícticos y productos epiclásticos en parte con más productos volcánicos intercalados. Este volcanismo calcoalcalino relacionado al arco de la Sierra Madre Occidental abarca el Oligoceno y parte del Mioceno, iniciando hacia el Mioceno Superior un volcanismo tipo intraplaca de andesitas basálticas y finalmente un volcanismo alcalino de basaltos olivínicos y basanitas en el Plio-Cuaternario (Barajas-Nigoche, 2008).

1.- Estratigrafía del Área de Estudio

1.1 TRIÁSICO.

Formación Zacatecas

La primera propuesta del nombre Formación Zacatecas fue hecha por Carrillo-Bravo en un reporte interno de PEMEX, pero la primera referencia publicada fue por Martínez-Pérez (1972), cabiendo señalar que en ambos casos no se realizó una definición formal. Originalmente Burckhardt y Scalia (1905 y 1906) describieron fauna del Triásico Superior cerca de la ciudad de Zacatecas, en el arroyo “La Pimienta”, también conocido como “La Calavera” o “El Bote”, que se encuentra aproximadamente a tres kilómetros al oeste de la ciudad de Zacatecas. Sin haberle asignado un nombre a la Formación, esta localidad, referida por Burckhardt y Scalia (*op. cit.*) como “el Triásico de Zacatecas” es considerada a la vez como la localidad tipo de esta unidad.

Chávez-Aguirre (1968) correlacionó con las capas triásicas expuestas en las cercanías de Zacatecas, a una secuencia de conglomerados, cuarzoarenitas y pizarras verdes expuestas cerca del Rancho La Ballena, que constituyen una secuencia sedimentaria marina, deformada y levemente metamorfoseada que consiste en esquistos y filita sericítica en varias partes de la Sierra de Salinas.

Dentro de los trabajos posteriores realizados en la Sierra de Salinas, se encuentra el de Silva-Romo (1994), quien propone definir a la Formación Zacatecas como formación La Ballena, y la describe como una secuencia turbidítica cuarcítica que contiene amonoideos y pelecípodos del Triásico Tardío y que está parcialmente afectada por metamorfismo de facies de esquistos verdes, la cual se encuentra expuesta en las cercanías de la ranchería La Ballena, en el municipio de Villa Hidalgo, Zacatecas. Utilizó el nombre de formación La Ballena informalmente para referirse a la secuencia marina del Triásico que él interpretó como un ambiente de depósito con litofacies asociadas a un abanico submarino. Así mismo, propone un espesor estructural para la unidad de más de 2500 m, sin embargo, Tristán-González y Torres-Hernández (1994) refieren un espesor perforado por el pozo “Tapon 1” de PEMEX (en reporte interno de la compañía paraestatal), ubicado al norte de Charcas, S.L.P., el cual cortó 4640 m de rocas de esta secuencia sin haber alcanzado su base. Entre otros autores que han trabajado en el área de La Ballena, se encuentran Bartolini et al. (2001), quienes reportan un espesor de 319 m, tomando en cuenta que es un espesor medido incompleto. En cuanto a las relaciones estratigráficas de la Formación Zacatecas, según Silva-Romo (*op. cit.*), no se distingue su contacto inferior; y el SGM en su léxico estratigráfico reporta que su base generalmente no aflora; y respecto a su contacto superior, es discordante con las rocas volcánicas de la Formación Nazas del Jurásico Inferior a Medio (Barboza-Gudiño *et al.*, 1999, 2008), o por ausencia de éstas, directamente con capas rojas de la Formación La Joya.

Chávez-Aguirre (1968), encontró fragmentos del amonoideo *Sirenites* sp. en varias localidades de la Sierra de Salinas, los cuales corresponden a una edad del Triásico y Silva-Romo (1994) reporta algunos ejemplares encontrados de amonoideos del género *Clionites* al sureste de La Ballena y otros en el arroyo La Haciendita, que corresponden a moldes de pelecípodos del género *Palaeoneilo* y algunos fósiles que pueden corresponder con *Halobia* sp., conjunto faunístico del Triásico Tardío; similar al reconocido en Burckhardt, 1905, quien describió el Triásico Tardío marino con fauna constituida por bivalvos y cefalópodos en rocas cercanas a la ciudad de Zacatecas. La Formación Zacatecas se correlaciona con la parte inferior del Grupo Huizachal del área de Tamaulipas (Mixon et al., 1959) o lo que posteriormente Barboza-Gudiño et al. (2010) definieron como Formación El Alamar; y con la Formación Santa Clara del Grupo Barranca de Sonora.

1.2 JURÁSICO.

Formación Nazas

Pantoja-Alor (1963), utilizó el término Formación Nazas para referirse a una secuencia de lavas interestratificadas con toba, lutita, limolita, arenisca y conglomerado; quien propuso la localidad tipo el área de Villa de Juárez, Durango; sobre el río Nazas. Años más tarde, Silva-Romo (1994), describe la unidad en el área de la Sierra de Salinas, conformada por dos miembros, uno basal volcánico y otro superior clástico. El miembro volcánico consiste principalmente en intercalaciones de derrames lávicos, piroclásticos brechoides y algunos aglomerados. Los derrames son de andesitas y de basaltos; este miembro presenta colores grisáceos con tonos verde y morado e intemperiza en color ocre. En cuanto al miembro clástico, consiste en una intercalación de limolitas con horizontes tobáceos cristalinos y conglomerados polimícticos formados por fragmentos de areniscas, de cuarzo de segregación y de rocas volcánicas andesíticas. De acuerdo con trabajos posteriores el miembro clástico es considerado como Formación La Joya (Barboza-Gudiño et al., 1999. 2008; Wengler et al., 2019).

La unidad ha sido estudiada en otras localidades, entre ellas se encuentra la Sierra de Catorce, en donde Barboza-Gudiño *et al.* (2004) describen una secuencia de rocas comparables con las descritas originalmente, como lavas y materiales piroclásticos de composición intermedia y félsica que incluyen en menor proporción rocas de composición máfica. Una de las descripciones más actuales de la unidad, es la de Eguiluz-de Antuñano *et al.* (2014), quienes la describen en el área de Villa Juárez, Durango, como dos miembros con capas depositadas en un ambiente continental. El miembro inferior presenta derrames volcánicos con cuerpos hipabisales intercalados entre limolitas, mientras que el miembro superior se compone de areniscas y limolitas que descansan en discordancia angular sobre el miembro inferior. Una descripción en general similar, pero con una edad sustentada por geocronología U-Pb en circones, ha sido reportada por Lawton y Molina-Garza (2014), quienes le asignan una edad de 169 ± 2 y 170 ± 2 m.a. (Aaleniano-Bathoniano temprano), del Jurásico Medio, que difiere notablemente de la edad triásica (230 ± 20 Ma) reportada por Pantoja-Alor (1972) y la edad del Jurásico Inferior (195 Ma) reportada por Bartolini y Marsaglia (1977) en todos los casos para ignimbritas riolíticas del alto de Villa Juárez.

El ambiente de depósito se define para esta formación como continental, en donde los paquetes de flujos de lava y tobas intercalados en el miembro volcánico sugieren una acumulación subaérea (Silva-Romo, *op. cit.*). Mientras que la mayor parte de la secuencia sedimentaria fue depositada en un cuerpo de agua somera, con un tipo de transporte de baja a mediana energía, lo que también sugiere un medio lacustre con variación de tipo fluvial y aluvial. Las estructuras de relleno de canal, estratificación lenticular y la presencia de lentes conglomeráticos con marcas de carga, entre otras, sugieren que éste se acumuló en un sistema fluvial meándrico; por otra parte, los horizontes calcáreos pueden representar acumulaciones lacustres. El mismo autor reporta un espesor en el área de aproximadamente 309.3 m; de los cuales 173 m corresponden al miembro volcánico, sin su base y 1363 m al miembro conglomerático. Sin embargo, Pantoja-Alor (1972), registra un espesor de 548 m en su sección tipo y PEMEX (1988), un espesor máximo de 600 m.

En el estudio de Pantoja-Alor (1972), se define el ambiente de depósito para esta Formación como, la mayor parte de la secuencia sedimentaria fue depositada en un cuerpo de agua somera, con un tipo de transporte de naja a mediana energía, lo que también sugiere un medio lacustre con variación de tipo fluvial y aluvial. Silva-Romo (*op. cit.*) menciona que la unidad se acumuló en un ambiente continental, en donde los paquetes de tobas intercalados en el miembro volcánico sugieren una

acumulación subaérea. Las estructuras de relleno de canal, estratificación lenticular y la presencia de lentes conglomeráticos con marcas de carga, entre otras, sugieren que éste se acumuló en un sistema fluvial meándrico; por otra parte, los horizontes calcáreos pueden representar acumulaciones lacustres. Mismo autor reporta un espesor en el área de aproximadamente 309.3 m; de los cuales 173 m corresponden al miembro volcánico, sin su base y 136.3 m al miembro conglomerático. Sin embargo, Pantoja-Alor (1972), registra un espesor de 548 m en su sección tipo y PEMEX (1988), un espesor máximo de 600 m.

En cuanto a sus relaciones estratigráficas, Barboza-Gudiño et al. (2004) y Barboza-Gudiño (2012), documentan que el contacto inferior de la unidad es discordante sobre rocas de la Formación Zacatecas, o bien la formación Ballena; y el contacto superior, es discordante bajo la Formación La Joya. En el área de la Sierra de Salinas, el contacto inferior de la unidad no está bien expuesto, sin embargo, Silva-Romo (1994) reconoce que claramente el contacto es discordante sobre la Formación La Ballena y subyace directamente a la Formación Zuloaga al considerar este autor a la Formación La Joya como parte superior de la Formación Nazas.

La edad para las rocas de la Formación Nazas se ha inferido por su posición estratigráfica, entre el Triásico Superior y el Jurásico Inferior a Medio; en la región del norte de Durango y Zacatecas se han reportado edades entre 230 ± 20 Ma, obtenida por el método de Pb- α en una riolita de la secuencia de Villa Juárez (Pantoja-Alor, 1972), 195 Ma por el método Ar/Ar (Bartolini y Marsaglia, 1997) y la edad reportada en uno de los trabajos más recientes, de Lawton y Molina-Garza (2014), en el que usaron el método de U-Pb para fechar ignimbritas de la parte superior de la Formación Nazas y obtuvieron edades de 169 ± 2 y 170 ± 2 Ma (Aaleniano-Bathoniano temprano), otro es el de Barboza-Gudiño et al. (2020), de 183 Ma de U-Pb en circones. Esta unidad se correlaciona con las Formaciones Huizachal, según los trabajos de Pantoja-Alor, (1963, 1972) y García-Padilla y Dromundo-Arias, (2005), quienes también la relacionan con La Formación La Boca. En el área de Real de Catorce, Barboza-Gudiño et al. (2004), ubicó a la Formación entre el Triásico Superior y el Jurásico Superior, y se le asigna una edad del Jurásico Inferior a Medio con base a una edad absoluta obtenida por el método U-Pb en circones; con intersecciones inferiores a los $172.3n \pm 5.1$ Ma, así como un dato de $206\text{Pb}/238\text{U}$ de la fracción concordante que representa la más probable edad de la roca, de 174.7 ± 1.3 Ma (Bajociano).

Formación La Joya

Definida por Mixon et al. (1959) como una secuencia clástica continental que aflora en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina, en Tamaulipas, su sección tipo fue descrita en el poblado de La Joya Verde, ubicado en el camino Ciudad Victoria-Jaumave. La secuencia fue descrita de base a cima como compuesta por conglomerado, algunos lentes de caliza, limolitas y mudstone, arenisca cuarzosa y conglomerado con estratificación cruzada. Generalmente las descripciones después de ésta concuerdan mucho con la original. Barboza-Gudiño et al. (2004) describe a la unidad en el área de la Sierra de Catorce como una secuencia tipo *fining upward* (grano-decreciente), con brechas o conglomerados polimícticos en la base, pasando por areniscas hasta transformarse en una secuencia monótona de limolitas rojas y en parte lutitas hacia la cima. PEMEX, (1988) definen su ambiente de depósito como correspondiente a una facies continental lacustre; pero Barboza-Gudiño et al. (*op. cit.*) agrega que el depósito es de rellenos aluviales que varían desde abanicos hasta planicies aluviales y posiblemente depósitos lagunares y marinos someros hacia el tope. Los mismos autores, definen un espesor inicial para la unidad de 200 m en la Sierra de Catorce; siendo el espesor máximo

medido de aproximadamente 500-600 m en el Cañón General y el lado oriente del Cerro La Descubridora; generalmente en otros lugares como el rancho La Joya o en el anticlinorio Huizachal-Peregrina varía entre 60 y 100 m y en algunas zonas desaparece por no depósito.

La unidad sobryace de manera discordante a las rocas volcánicas de la Formación Nazas y subyace de manera concordante y transicional a las calizas de la Formación Zuloaga, del Oxfordiano. Por su posición estratigráfica, es ubicada entre el Jurásico Medio y el Oxfordiano. La unidad es en parte correlacionable con la Formación Minas Viejas de la transgresión marina del Jurásico Medio-Superior, aunque en parte también la subyace (Salvador, 1987) y con la Formación Cahuassas (Salvador, 1991).

Formación Zuloaga-La Gloria

Imlay (1938), fue quien denominó Formación Zuloaga a una secuencia calcárea de plataforma; consideró como localidad tipo a la Sierra de Sombrerito, al norte de Melchor Ocampo, Zacatecas. La secuencia consiste de calizas, calizas dolomíticas y dolomías de color gris oscuro, en estratos que varían de gruesos a masivos; hacia la cima contiene nódulos de pedernal, Silva-Romo (1994). Imlay (1938, 1953) describe esta unidad constituida principalmente de caliza de estratificación gruesa, presentándose en capas de 3-5 e incluso 10 pies, generalmente de coloración gris oscura, aunque las partes inferiores a media se pueden observar capas de color gris medio a claro; en algunas secciones, las partes superiores pueden presentar nódulos de pedernal negro y localmente algunas capas presentan bivalvos, gasterópodos o corales pobremente conservados. Barboza-Gudiño et al. (2004) describen a la Formación Zuloaga como una secuencia de calizas micríticas a microesparíticas, con presencia de yeso hacia la parte sur de la Sierra de Catorce; así como la ocurrencia limitada de cristales de calcita pseudomorfo de yeso hacia la base de la secuencia y algunos bancos brechados con fragmentos angulosos y estructura tipo "rompecabezas", así como indicios de flujo de soluciones, por lo que interpretan a las rocas como brechas por disolución de yeso. En cuanto a su ambiente de depósito, existen descripciones bastante similares, dentro de las que se encuentran la de Imlay (1953), que fue una de las primeras, en donde menciona que se formó como un depósito batial, pero también como un depósito cercano a la costa, con clima uniforme y escaso aporte de terrígenos. Una de las descripciones más actuales, es la de Pessagno y Martín (2003) quienes consideran que la asociación faunística indica que fue depositada en profundidades no mayores a los 100 m, sobre un banco carbonatado en profundidades neríticas libre de la energía del oleaje. El espesor para esta unidad es variable, se han reportado en su localidad tipo alrededor de 548 m, siendo este uno de los mayores espesores reportados, otro de hasta 700 m, en la Sierra de Presitas, Coahuila (Pérez-Rul, 1967), y mínimos de aproximadamente 53-103 m en la Sierra Madre, al sur de Nuevo León y sureste de Tamaulipas, por Imlay (1953). La Formación Zuloaga cubre discordantemente a la Formación Nazas, Silva-Romo (2004) y de manera concordante y transicional a la Formación La Joya, Barboza-Gudiño et al. (2004) y su contacto superior es nítido y concordante con las rocas de la Formación La Caja, Silva-Romo (*op cit.*) y por la Formación La Casita, Pérez-Rul, 1967). Imlay (1938) menciona que esta unidad es equivalente lateral (off-shore) de la Formación La Gloria; mientras que Oivanki (1974) menciona que la Formación la Gloria cambia transicionalmente hacia arriba a carbonatos de plataforma de la Formación Zuloaga. La Caliza Zuloaga ha sido ubicada de manera general en el Oxfordiano, esencialmente por su fauna de amonites y pelecípodos (Buckhardt, 1930), pelecípodos (Imlay, 1940) y corales (Reyeros de Castillo, 1978), aunque su fauna más característica son los gasterópodos del género *Nerinea*, (Barboza-Gudiño et al., 2004). Esta unidad ha sido correlacionada

con las formaciones Novillo, Santiago, Olvido, La Gloria y Las Trancas, de acuerdo con Tristán-González y Torres-Hernández (1992).

Formación La Casita-La Caja

La Formación La Casita, fue propuesta por Imlay (1936), en el Cañón La Casita, al sureste de Saltillo, Coahuila, en donde está reconocida su localidad tipo. Y la describe como una intercalación de lutita, arenisca y capas de caliza; 180 ft (55 m) de lutita carbonosa negra a gris oscuro, intercalada con capas de carbón y delgadas capas de caliza amarilla. Mismo autor, pero en 1937 divide a la unidad en 2 miembros, el inferior consiste en arenisca conglomerática, arenisca que puede contener braquiópodos, bivalvos y belemnites; el miembro superior consiste de lutita negra, algunas lutitas arenosas grises, y pequeños lentes de arenisca, caliza arenosa y nódulos de caliza. El ambiente de depósito es probablemente un ambiente lagunar y la presencia de carbón indica condiciones de aguas salobres, en algunos intervalos la laguna pudo estar en conexión con el mar. PEMEX, (1988b) mencionan que la presencia de moluscos en las lutitas negras de esta formación, sugieren ambientes de plataforma somera, la presencia de conglomerados basales implica condiciones continentales al inicio del Kimeridgiano. Esta unidad tiene un espesor muy variable, con un promedio de 400 m, aunque en el área de Placer de Guadalupe, Chihuahua, se midieron aproximadamente 1300m, PEMEX, (1988b). En algunos otros lugares los espesores son delgados a comparación de los mencionados, con aproximadamente 61 m en la Sierra de Parras (Imlay, 1936), por mencionar un ejemplo. La base de la Formación La Casita está ubicada en el contacto de la arenisca conglomerática con la caliza con *Nerinea* (Formación La Gloria); su cima está marcada por un contacto abrupto con la caliza basal de la Formación Taraises (Imlay, 1937). El contacto entre la Formación La Casita y Taraises inferior es transicional (Cantú-Chapa, 1999). La edad de la unidad es generalmente definida por la presencia de fauna, Roberts (1989 en Olmstead, 1999), con base en su contenido de amonitas le asigna una edad del Kimeridgiano temprano al Tithoniano tardío. Generalmente la unidad es correlacionable con la Formación La Caja, que es la correlación apropiada para esta Formación, según Pessagno Jr. y Martin (2003).

1.3 CRETÁCICO.

Formación Taraises

Descrita por Imlay (1936) en la Sierra de Parras, Coahuila; como una formación de calizas de edad Valangiano que las divide en dos miembros litológicos, con alta presencia faunística, donde resaltan los amonites. Su localidad tipo está designada en el Cañón Taraises. Barboza-Gudiño *et al.* (2004), describen a esta unidad en la Sierra de Catorce como una alternancia de capas delgadas a medianas de calizas arcillosas con algunas bandas de pedernal negro y alternancia de horizontes delgados de materiales terrígenos. La fauna para esta zona está mal preservada, entre la que se reconoce algunos amonites y belemnites. Existen varias interpretaciones respecto al ambiente de depósito en que se originó esta Formación, entre los que se encuentran plataforma externa (PEMEX, 1988; Adatte *et al.*, 1991; Barboza-Gudiño *et al.*, 2004), plataforma abierta en forma de rampa (Eguiluz, 1989), y plataforma somera cercana a la línea de costa (Ángeles-Villeda, 2004; Molina *et al.*, 2004; Romo-Ramírez *et al.*, 2008; Canizal-Sosa y García-Ruiz, 2009); así mismo se encuentran otros autores entre los que registran ambientes de depósito con facies de una zona batial y pelágicas; de cuenca profunda, de cuenca que cambia lateralmente a margen arrecifal, depósito sublitoral y complejo deltaico. El espesor de esta unidad varía según su localidad de afloramiento, siendo en algunos

lugares algunos cuantos metros como, 10, 25, 30 m y en otros abarcando hasta los 300 m o más. El contacto inferior de esta unidad es concordante y transicional con la Formación La Casita, La Caja, Pimienta y Carbonera; mientras que su contacto superior es transicional y concordante con la Formación Cupido y con la Formación Tamaulipas Inferior, según la ficha de la unidad litoestratigráfica (Léxico Estratigráfico de México). La edad de la Formación es dada con base al contenido paleontológico y a la posición estratigráfica y corresponde al Cretácico Temprano (Berriasiano-Hauteriviano), en general, tomando en cuenta estudios de Imlay (1936), hasta los más actuales como Tristán-González y Torres-Hernández, (1992, 1994); Montañez-Castro y Torres-Durán, (2002); Escalante-Martínez y Rodríguez-Rodríguez, (2004); Montañez-Castro, (2006); Escalante-Martínez y Rodríguez-Rodríguez, (2007); Romo-Ramírez *et al.*, (2008). La unidad se correlaciona con las formaciones Fresnillo, Santuario, Las Vigas, Mezcalera, Barril Viejo. Por otro lado, también la correlacionan con las formaciones San Marcos, Navarrete, Colorada y Menchaca; entre otras.

Formación Tamaulipas Inferior-Cupido

Descrita por Muir (1936), quien divide a la Caliza Tamaulipas en tres unidades independientes, 1) las correspondientes al Cretácico (Albiano-Cenomaniano) bajo el término de Tamulipas Superior, 2) a los estratos de calizas del Cretácico Inferior (Neocomiano inferior-Aptiano) como Tamaulipas Inferior, y 3) como El Horizonte Otates (equivalente a la Formación La Peña), separando las dos unidades anteriores. La localidad tipo para esta Formación no está establecida. Muir (*op. cit.*) describe a la unidad como una serie de calizas cristalinas, usualmente sin pedernal. Díaz (1953), propone que el nombre de Formación Tamaulipas Inferior sea restringido al noreste de México y que el nombre de Formación Cupido (Imlay, 1937), sea usado para secuencias similares hacia el poniente. Por lo tanto, estas Formaciones son equivalentes entre sí. Barboza-Gudiño *et al.* (2004) describen a la Formación Tamaulipas Inferior en la Sierra de Catorce constituida por calizas micríticas tipo mudstone a wackestone en capas gruesas a bancos, con típicos nódulos irregulares de pedernal, estilolitas paralelas a la estratificación, nódulos de hierro y pequeños amonites. De acuerdo con Manjarrez-Hernández y Hernández de la Fuente (1989), las rocas de esta unidad se depositaron en un medio marino de aguas someras, cálidas de libre circulación, en un clima templado y litorales retirados que no permitían la predominancia de sedimentos terrígenos; Barboza-Gudiño *et al.* (*op. cit.*) interpretan que se depositó en un ambiente pelágico de cuenca con moderada profundidad, aguas tranquilas, bien oxigenadas. El espesor varía para esta unidad, de los espesores más bajos reportados es el de 214 m en el Valle del Huizachal, Carrillo Bravo (1961) y el mayor espesor registrado es de 650 m por Romo-Ramírez *et al.* (2008). La unidad sobreyace concordantemente a las Formaciones Pimienta, La Casita, San Pedro y Taraises (PEMEX, 1988); mientras que su contacto superior es transicional con las Formaciones La Peña, Horizonte Otates, Tamaulipas Superior y Orizaba. La edad mejor considerada para La Formación corresponde al Berriasiano-Aptiano que es el alcance estratigráfico más amplio, asignado por Manjarrez-Hernández y Hernández de la Fuente (1989). Se correlaciona con las Formaciones La Peña (Longoria, 1975), entre otras como San Lucas e Ixcatepec de la Cuenca de Michoacán, Nexapa Atzompa, etc. (Manjarrez-Hernández y Hernández de la Fuente, 1989).

1.4 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

En la figura 6 se muestra la columna estratigráfica general del área que comprende la zona de estudio y sus alrededores, con las unidades mencionadas en los apartados anteriores, mientras que en la

figura 7, se muestra específicamente la columna que corresponde al área de La Ballena Zacatecas, en donde se agrega la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior con su ubicación temporal y estratigráfica conforme a los resultados de los datos geocronológicos con los que se cuentan (detallados en el capítulo 5).

Columna Estratigráfica

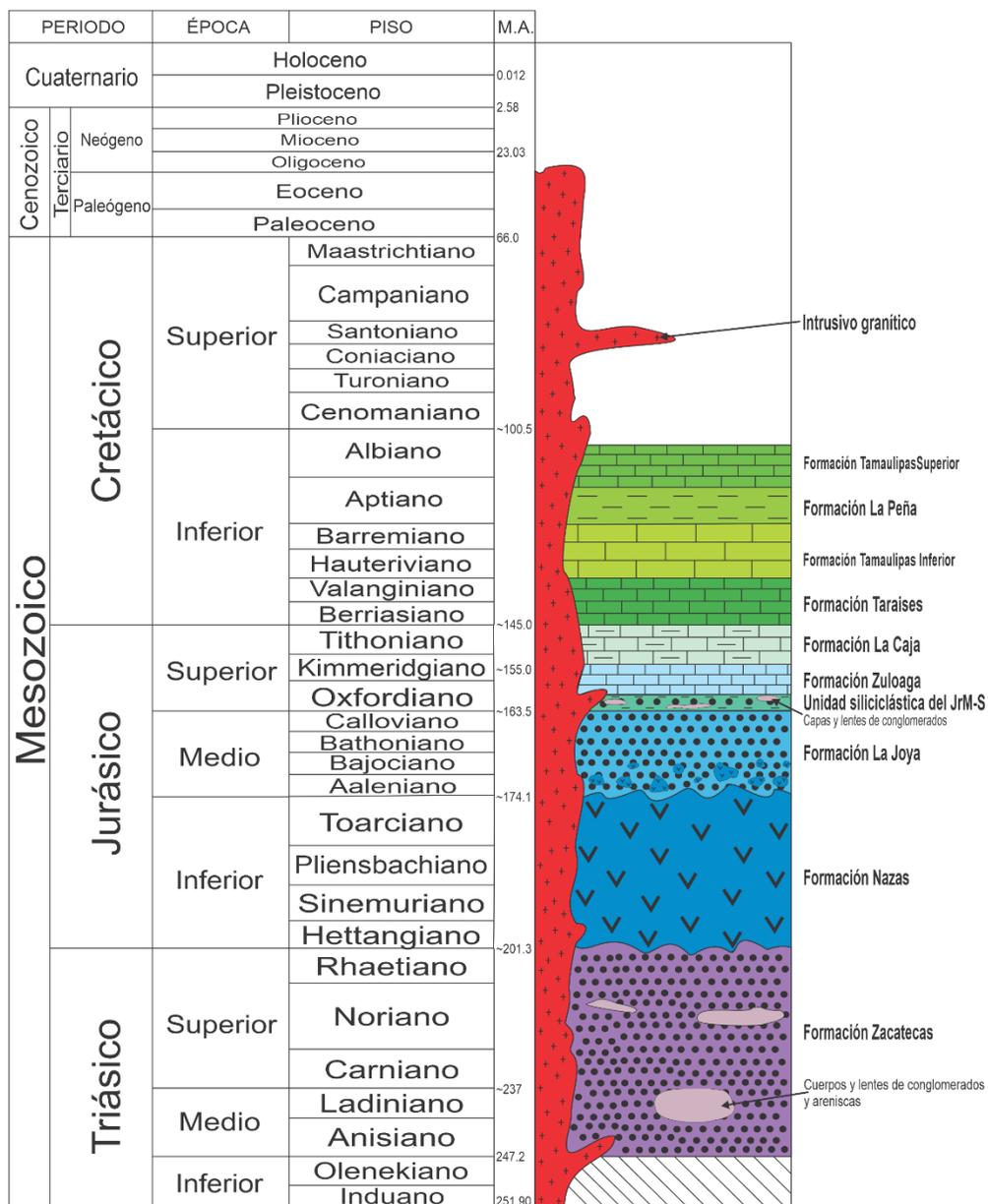


Figura 6. Columna estratigráfica general del área.

Columna Estratigráfica de Cerro Grande

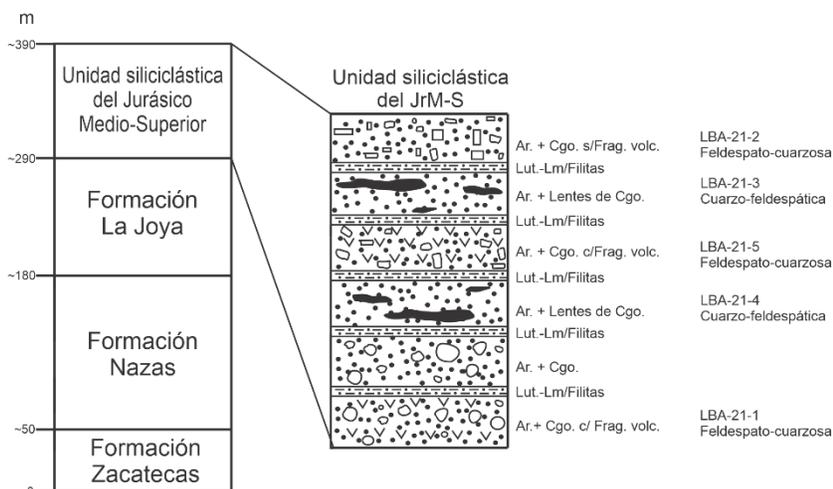
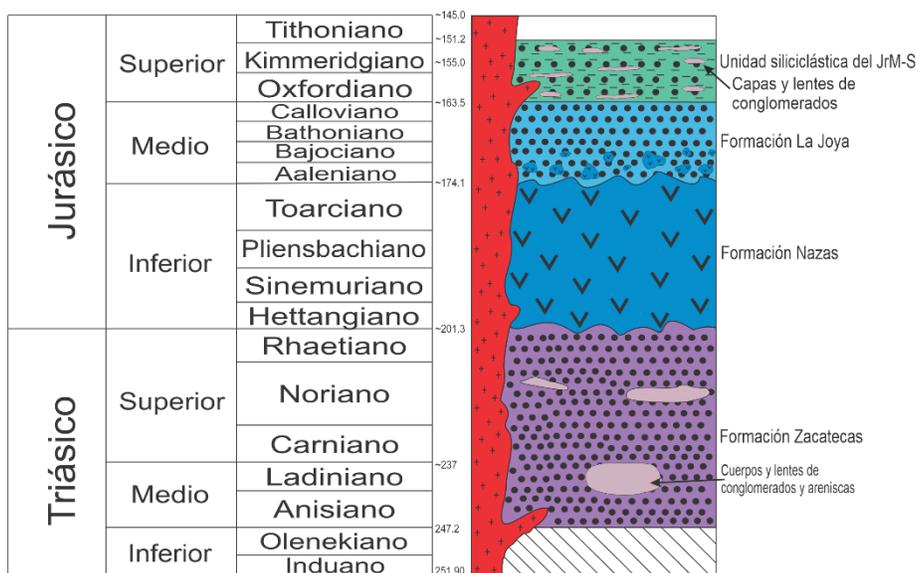


Figura 7. Columna estratigráfica de Cerro Grande, La Ballena, Zacatecas, ubicando a la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior en el tiempo geológico.

2.-Detalle Geológico–Estructural del Área de Estudio.

En lo que respecta a la geología local de Cerro Grande, Sierra de Salinas, Zacatecas (figura 8), se detalló la litología del área en los afloramientos del recorrido que se muestra en la figura 9, se hizo la descripción petrológica en campo y el levantamiento de un perfil estratigráfico para hacer la correlación de las unidades vistas con las previamente registradas en la zona. Hacia las faldas del cerro se presenta la Formación Zacatecas, seguida hacia la cima por la Formación Nazas, la Formación La Joya y la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior.



Figura 8. Vista panorámica del cerro Grande, Sierra de Salinas, cerca de la localidad La Ballena, Zacatecas.



Figura 9. Recorrido de campo en Cerro Grande, Sierra de Salinas, Zacatecas con los puntos de los afloramientos de las unidades reconocidas y su acomodo con respecto a la falla.

El primer afloramiento se encuentra en el punto 14Q 0222424/2487296, la unidad se identificó como Formación Zacatecas, se presenta como intercalación de capas delgadas de aproximadamente 4.5 a 1.5 cm de lutitas (pizarras o filitas), ligeramente deleznable, color gris oscuro a negro en superficie fresca, y color ocre a verdosas en superficie intemperizada, presentan deformación penetrativa con planos S1 que cortan los pliegues más claramente en sus charnelas (figura 10).



Figura 10. Intercalación de pizarras y limolitas o areniscas de grano fino de la Formación Zacatecas, a la izquierda pueden observarse las capas ligeramente plegadas y a la derecha los planos de foliación de las mismas.

El segundo afloramiento se encuentra en el punto 14Q 0222521/2487455 del cual se tomó la muestra LBA-20-02, de la unidad identificada como Formación Nazas, presente como una secuencia de rocas sedimentarias con componentes volcánicos de color gris obscura con clastos muy finos blancos y algunos más oscuros, ferromagnesianos. Las rocas se identifican generalmente como brechas y los componentes volcánicos como andesitas de color gris oscuro a púrpura y rojizo. En ocasiones presentan diaclasamiento.

El afloramiento número 3 corresponde a las coordenadas 14Q 0222391/2487536, en el que se presentan rocas con pseudoestratificación y clivaje S1, identificadas como andesitas afaníticas o microcristalinas color gris oscuro con tonos púrpuras (Figura 11).



Figura 11. Rocas andesíticas con pseudoestratificación y clivaje de la Formación Nazas.

El afloramiento identificado con el número 4, se encuentra en el punto 14Q 0222301/2487648, en el que se colectaron las muestras LBA-20-4, LBA-20-4b y LBA-20-4b1, identificadas en campo como

conglomerado-brecha de color gris con tonalidades amarillentas, compuesto por clastos subangulosos a subredondeados de cuarzo, cuarcitas y pedernal gris del tamaño de arena muy gruesa a gravilla, alternando con arenisca de grano fino a medio; siendo una intercalación de areniscas-conglomerados-areniscas de espesores aproximados de 1 m por capa, figura 12.



Figura 12. Conglomerado-brecha con presencia de intemperismo y alteraciones de óxidos en contacto con areniscas de grano fino a medio hacia la cima (parte de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior).

El siguiente afloramiento que corresponde al número 5, se encuentra en el punto 14Q 222165/2487688, que corresponde a una intercalación de rocas de la Formación La Joya, compuesta por areniscas con conglomerados en bancos de más de 1-1.5 m de espesor con horizontes de 0.3 a 0.5 m correspondientes a las areniscas, color gris de grano medio. Muestras levantadas, LBA 20-5 y LBA 20-5b, figura 13.



Figura 13. A la izquierda se muestran areniscas con presencia de diaclasas y a la derecha un banco de conglomerado compuesto por clastos de andesitas de coloración púrpura a negro.

El punto 6, 14Q 0222153/2487719, se identificó como la base de la intercalación de los conglomerados y areniscas de la Formación La Joya.

Hacia la cima del cerro los paquetes de conglomerado son más delgados que los de las areniscas, mientras que, hacia su base, se adelgazan los de areniscas y los de conglomerado resultan ser más gruesos. Conforme se avanza en la alternancia, los conglomerados presentan clastos volcánicos escasos en algunos paquetes, mientras que en otros no.

El afloramiento número 7, se encuentra en las coordenadas 14Q 0221863/2487444 donde se tomó la muestra LBA-20-7 en los estratos de la Formación Zacatecas y se identificó como una arenisca de grano medio intercalada con capas delgadas de limolita y pizarras color gris a verdoso. Se observa intensa silicificación y vetas de cuarzo. En ocasiones las capas se encuentran plegadas (figura 14).



Figura 14. Capas plegadas con presencia de intemperismo de la Formación Zacatecas.

Siguiendo con la descripción de los afloramientos, la siguiente serie se identificó con letras para no crear confusión con los ya descritos; empezando en orden alfabético, se tiene el afloramiento identificado con la letra A, que corresponde al punto 14Q 0222385/2487471, es la subida a Cerro Grande por la ladera SW viendo hacia la localidad La Ballena. Afloran hacia el poniente conglomerados-brechas de la Formación La Joya con abundantes fragmentos de rocas volcánicas, principalmente andesitas de color gris oscuro a púrpura, que sobreyacen a las mismas andesitas en formas de derrames de la Formación Nazas. Mientras que al Este de este mismo punto afloran rocas volcánicas muy intemperizadas de la Formación Nazas, es decir, se yuxtaponen la Fm. Nazas y la Fm. La Joya en una aparente falla normal que no se observa muy bien, pero se puede inferir con bastante certidumbre siguiendo una traza aproximada N30°-40°E y un echado de ~60° al NW, figura 15.

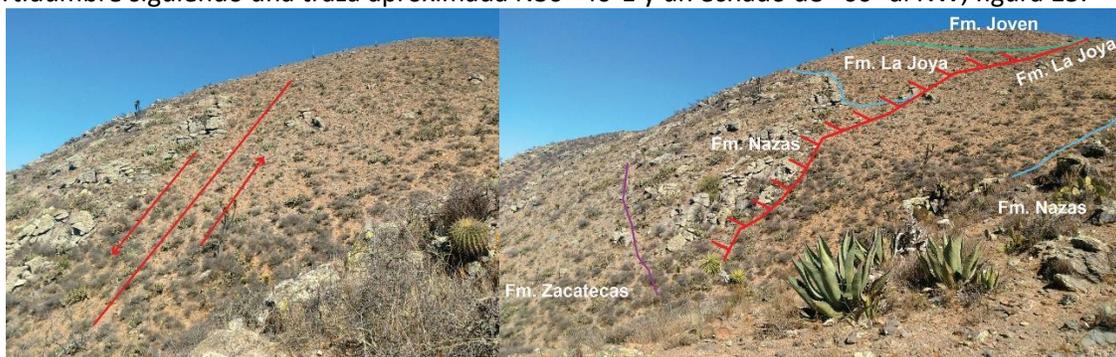


Figura 15. Falla normal que desplaza las unidades jurásicas en la ladera derecha de Cerro Grande (viendo hacia el N-NE).

Probablemente por el desplazamiento que provocó esta falla, no se encontraba bien registrada la disposición de las unidades hacia la cima del cerro, como la Formación Nazas por encima de la Formación Zacatecas que ahora se registra en el mapa geológico que se muestra en la figura 22.

En el punto B, con coordenadas 14Q 0222365/2487492, se identifica la unidad siliciclástica del Jurásico Medio- Superior, aparentando ser la parte superior de la Formación La Joya, ya que sobreyacen las brechas de dicha formación. Se trata de areniscas estratificadas de grano fino a medio, en capas de ~14 cm de colores rojizos a verdosos (figura 16), intemperizadas y con presencia de mucho cuarzo, alternando hacia arriba con capas y/o bancos de metapelitas (por metamorfismo de bajo grado) de algunos centímetros y conglomerados.

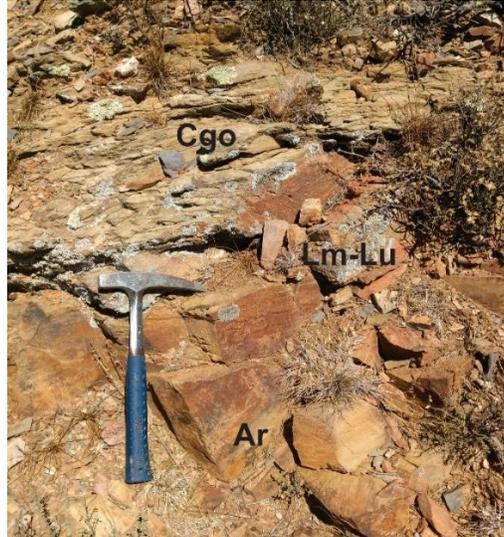


Figura 16. Rocas de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, intercalación de conglomerados, limolita-lutita y areniscas de grano medio.

Este afloramiento forma parte del bloque caído al poniente de la supuesta falla, al oriente se encuentra el bloque del alto en donde se observa la Formación Nazas bastante alterada.

El siguiente punto, C, se encuentra en las coordenadas 14Q 0222148/2487707 en donde se recolectó la muestra LBA-21-1 y se identifica un contacto entre los conglomerados con y sin fragmentos volcánicos que pertenecen a la sección de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, la cual sobreyace a la Formación La Joya y las areniscas de esa unidad arrojan edades más jóvenes que el Jurásico Medio.

De base a cima, la sección inicia con conglomerado-brecha policmítica con componentes de rocas volcánicas en clastos subredondeados de 1-5 cm de diámetro, principalmente de andesitas y también cuarcos chert jasperoides rojos, y cuarcitas en matriz de grano medio. El conglomerado sin fragmentos volcánicos contiene clastos de rocas sedimentarias, areniscas, clastos rojizos y fragmentos de cuarcos en matriz de grano fino. Se presentan en bancos gruesos con estratificación algo irregular, pero con clivaje espaciado subparalelo a la estratificación (figura 17) en aproximadamente 10 m de espesor parcial.



Figura 17. Clivaje subparalelo a la estratificación de los conglomerados de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior.

El punto D, se encuentra en las coordenadas 14Q 0222158/2487686, hacia la cima del punto anterior, en el que sobreyace un paquete de aproximadamente 15 m de areniscas conglomeráticas, con mucha matriz y sin fragmentos volcánicos, compuesta por clastos retrabajados de tamaños variados entre 1 y 3 cm de diámetro de colores rojizos a grisáceos y amarillentos; la estratificación no es muy buena en general, pero si se distingue en algunos puntos, por lo que no se observa una discordancia angular con respecto al conglomerado-brecha subyacente.

Continuando hacia la cima, en el siguiente punto, E, con coordenadas 14Q 0222166/2487689, se encuentra un contacto entre lutitas, areniscas y conglomerado con escasos fragmentos volcánicos, pero más angulosos que los afloramientos pasados (figura 18). Las areniscas son de grano muy fino a medio de colores grises a verdosos sobreyacidas por conglomerados/brechas de fragmentos subangulosos de cuarzo, cuarcitas, rocas silíceas y escasos clastos de andesita oscura, los clastos son de aproximadamente 1 a 3 cm de diámetro.



Figura 18. A la izquierda contacto entre conglomerado volcánico (arriba) y areniscas (abajo), a la derecha, conglomerado con fragmentos volcánicos.

En el punto F con coordenadas GPS 14Q 0222195/2487672 continúa la secuencia de areniscas de grano medio a grueso con lentes y horizontes de conglomerados/brechas con alto contenido de matriz arenosa, clastos de 1-3 cm de diámetro, predominantemente no volcánicos, subredondeados a angulosos de cuarzo y rocas silíceas de colores verdosos a grises. En este punto se levantó la muestra con clave LBA-21-2.

En el siguiente afloramiento, identificado con la letra G y coordenadas GPS 14Q 0222282/2487658 se levantaron las muestras LBA-21-3 y LBA-21-4, pertenecientes a un afloramiento con rocas de tipo arenisca de grano medio a grueso, presente en colores verdosos a amarillentos, intercalada con lentes de conglomerados/brecha, con fragmentos subangulosos de menos de 1 cm de diámetro.

Hacia la cima de este paquete, predominan las areniscas y desaparecen las brechas.

En el punto H, con coordenadas GPS 14Q 0222305/2487642 se identificó un horizonte de limolita de color naranja a rosa claro, delgado pero notorio debido a que no se presentó en el resto de la secuencia medida.

Finalmente, en el punto I, GPS 14Q 0222343/2487619 se presenta una brecha de fragmentos pequeños de cuarzo y cuarcitas con algunas areniscas de grano grueso coronadas en la cima por limolitas-lutitas apizarradas con mala estratificación y presencia de clivaje.

En la figura 19 se ilustra la sección medida y descrita en los afloramientos mencionados y es la representación gráfica de lo que se define como Formación Joven.

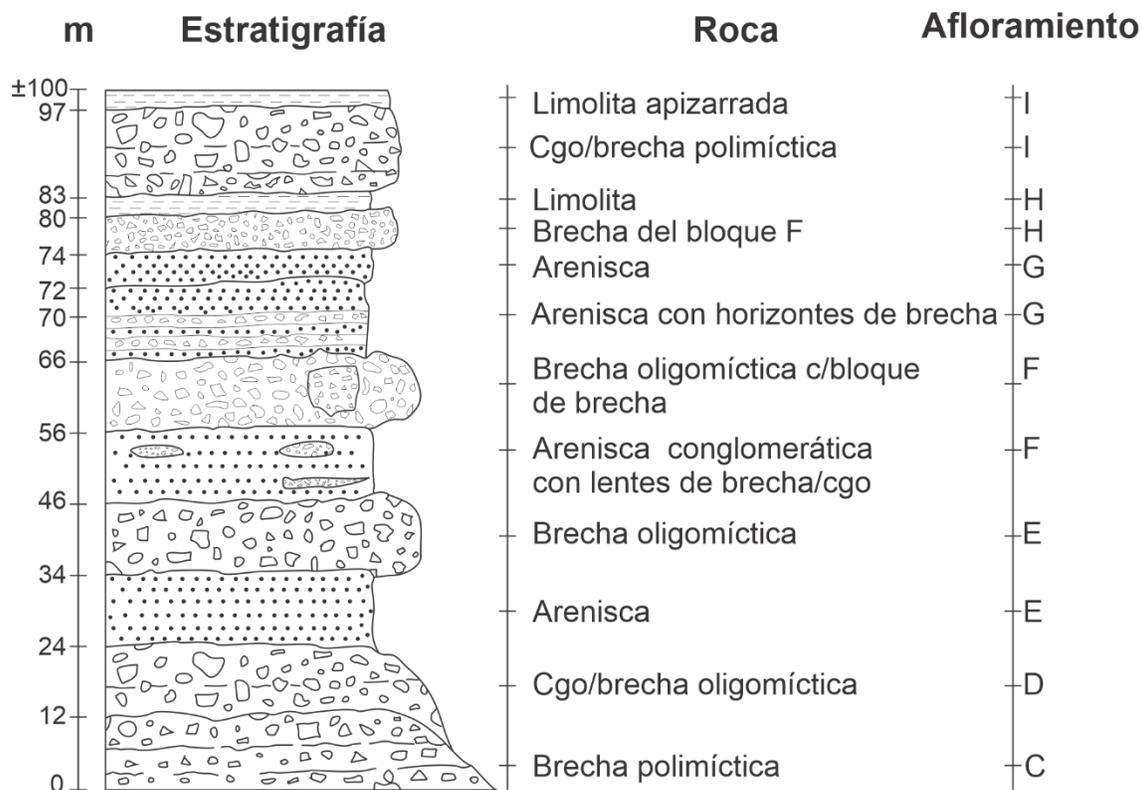


Figura 19. Columna estratigráfica representativa de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, la escala es un aproximado de lo medido en campo, que corresponde a ± 100 m de la unidad.

En el mapa de la figura 20 se define el área donde se identificó la unidad siliciclástica que resulta ser más joven que las edades registradas para la Formación La Joya, por lo que se identificó con un nombre provisional y para fines del trabajo, como "unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior (UsJrM-S)".



Figura 20. Mapa geológico del área La Ballena, Zacatecas, modificado de Barajas-Nigoche, 2008. En el mismo, se observan los puntos del perfil levantado y muestras colectadas, así como la sección A-A' que aparece en la parte inferior de la misma figura.

En el área de estudio se tienen previamente registradas deformaciones asociadas a eventos compresivos y extensivos, en los que se distinguen 2 fases principales para cada tipo de deformación. Algunas estructuras están asociadas a eventos previos a la orogenia Laramide y están representadas por sistemas de esquistosidad que definen eventos de tipo compresivo previos al Jurásico y que están presentes en la Formación Zacatecas a un nivel microestructural (Escalante, 2006). Dentro de los eventos compresivos registrados en el área, se encuentra la deformación que desarrolló superficies de foliación (S1) con base a la presencia de cuarzo de segregación en la Fm. Zacatecas, por lo que se considera que ese evento ocurrió posiblemente en el Triásico Superior-Jurásico Inferior, antes del vulcanismo que dio origen a la Formación Nazas (Barajas-Nigoche, 2008). Esta fase que registra foliación en las rocas es considerada como parte del primer evento asociado a una deformación compresiva, mientras que el plegamiento de esta foliación y la generación de pliegues en las unidades presentes en el área, así como el desarrollo de algunas lineaciones forman parte de la segunda fase compresiva (Silva-Romo, 1994). Es probable que el metamorfismo-anchimetamorfismo de muy bajo grado que muestran las rocas del área haya sido generado durante estos procesos compresivos. Para las estructuras que se desarrollaron posterior a la fase compresional laramídica y que algunos autores las definen como post-laramídicas, han sido generadas durante un evento de origen extensivo y generalmente son identificadas por la presencia de fallamiento tipo normal y desplazamientos laterales. Tristán-González (1986), documenta un evento extensional para la Mesa Central, que tuvo lugar entre los 27 y 28 Ma. El primer evento extensional registrado en el área está asociado con la apertura del Golfo de México, el cual está evidenciado con el depósito de sedimentos clásticos continentales, conocidos como Formación La Joya. La segunda fase extensiva está definida por la aparición de un sistema de fallas y lineamientos, que son los responsables de la configuración de la Sierra en fosas y pilares tectónicos, representativos de la morfología actual de la región. Los rumbos preferenciales registrados para las fallas normales son NNW-SSE, y en ocasiones se encuentran asociados cuerpos intrusivos de composición granítica (Barajas-Nigoche, *op. cit.*). La disposición de las unidades y de las estructuras registradas en el área, se encuentran representadas en las redes estereográficas tipo Schmidt de la figura 21.

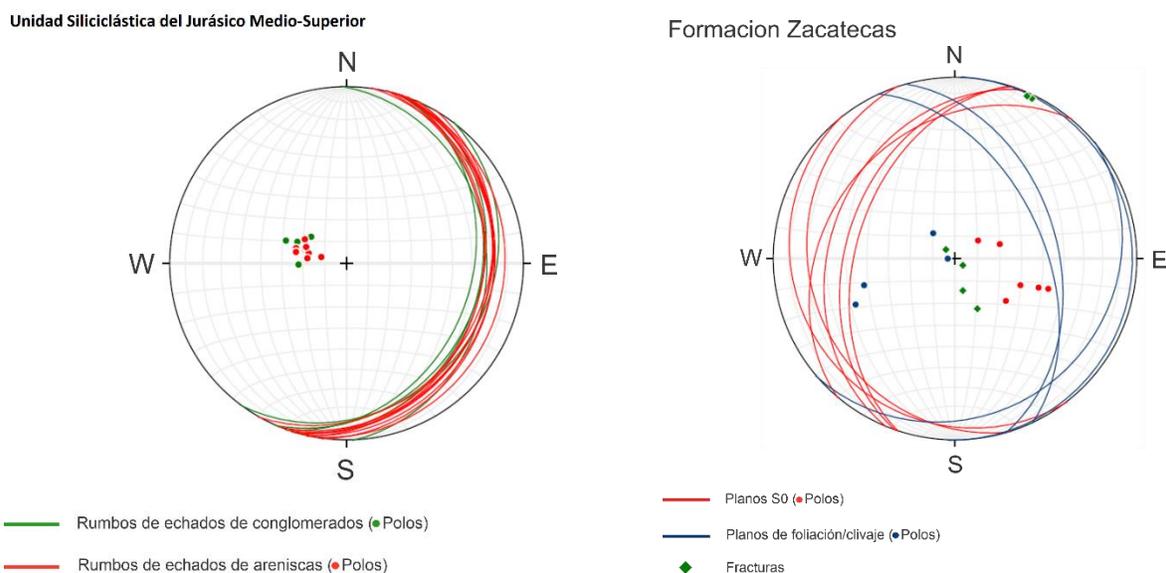
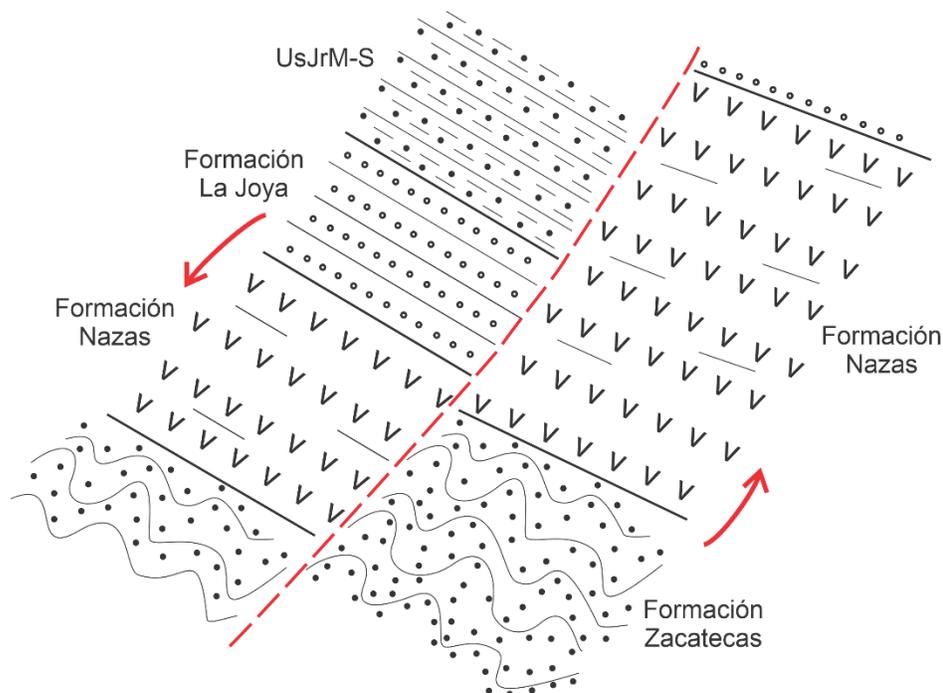


Figura 21. A la izquierda se encuentra representada la disposición de los estratos de lo que viene siendo la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior, y a la derecha los datos estructurales tomados en la Formación Zacatecas.

Como se observa en la figura 21, el rumbo general de los estratos de la unidad siliciclástica es NNE-SSW y no se lograron identificar otras estructuras bien definidas para su medición, como las registradas para la Formación Zacatecas. Sin embargo, como se mencionó en el apartado anterior, se identificó una falla de tipo normal que ha desplazado las unidades en Cerro Grande y se infiere con bastante certidumbre que sigue una traza aproximada N30°-40°E y un echado de ~60° al WNW. Figura 22.



Falla normal con desplazamiento hacia la izquierda siguiendo una traza aproximada N30°-40°E y un echado de ~60° al NW.

Figura 22. Representación gráfica del desplazamiento de los estratos que provocó la falla normal entre las rocas de las unidades presentes en Cerro Grande, La Ballena.

En contraste con las unidades anteriormente depositadas, la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior no presenta rasgos estructurales significativos de deformación en las rocas.

3.- Petrografía de la Secuencia Siliciclástica del Área

La petrografía que se realizó para este trabajo consistió en la generación de 13 láminas delgadas en el laboratorio de laminación del Instituto de Geología de la UASLP y la descripción de las mismas, junto con otras 17 con las que ya se contaban, dando un total de 30 láminas delgadas, de las cuales 15 corresponden a rocas de tipo areniscas y se clasificaron mediante el diagrama ternario QFL de Garzanti (2019), donde se toma en cuenta el porcentaje de cuarzo, feldespatos y líticos que contiene la roca y se basó en un conteo modal sobre una base de 250 a 300 puntos aproximadamente por lámina delgada libres de matriz y/o cemento, mientras que para las ígneas se utilizó el diagrama de clasificación QAPF de Streckeisen (1976).

3.1.- Descripción petrográfica de la localidad La Ballena, Zacatecas.

A continuación, se muestran las descripciones microscópicas de las petrofacies determinadas para las rocas de la unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior que corresponden a 15 areniscas, divididas en Petrofacies A: feldespato-cuarzosas, Petrofacies B: cuarzo-feldespáticas y Petrofacies C: cuarcitas, seguidas de las descripciones de 7 rocas de tipo conglomerado-brecha y finalizando con las 8 de tipo volcánicas.

3.1.1. Serie de Petrofacies

PETROFACIES A:

Rocas areniscas clasificadas como feldespato-cuarzosas, esta es la petrofacies principal debido a que contiene el mayor número de rocas dentro de su clasificación, las cuales corresponden a las siguientes 10 claves: LB-06-1, LB-09-3, LB-09-31, LBA-20-4, LBA-20-4b, LBA-20-4b1, LBA-20-5, LBA-21-1, LBA-21-2, LBA-21-5.

En general, se tratan de rocas sedimentarias clásticas que varían en su tamaño de grano entre muy finos a gruesos, siendo los de tamaño medio los más comunes, constituidas por cuarzo, feldespatos, líticos y minerales accesorios en orden de abundancia. Los componentes se encuentran soportados en una matriz arcillo-arenosa frecuentemente mayor al 10% y menor al 30%, compuesta generalmente por microcristales de feldespatos y sericita pero en ocasiones se presenta cementante carbonatado. El cuarzo se presenta en cristales de tamaño fino a medio, subangulosos a subredondeados monocristalinos con extinción recta mayor que la ondulada y policristalinos en menor cantidad con extinción individual grano a grano con contactos que van de rectos a suturados, en ocasiones se presentan cuarzos metamórficos recrystalizados y/o esquistosos y estrías o vacuolas en los monocristalinos. Los feldespatos de tipo alcalino se presentan más que las plagioclasas, se identifica la microclina y macla de tipo Carlsbad para los alcalinos y de tipo polisintética para las plagioclasas, se presentan en cristales de tamaño finos a medios y están fuertemente alterados por sericita. Los líticos están presentes en muy baja proporción y se identifican de tipo sedimentarios de areniscas principalmente y algunos félsicos en granos de tamaño fino. Los minerales accesorios son de tipo máficos, carbonatados y opacos en general, dentro de los que se identifican piroxenos (augita), óxidos (hematita), biotita, dolomita, calcita y también se presenta la sericita en cristales de tamaño fino a medio, subhedrales a anhedrales. Algunas rocas presentan alteraciones por oxidación y fracturas rellenas de material carbonatado, cuarzo u óxidos. Figuras 23-32.



Figura 23. Lámina LB-06-1: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

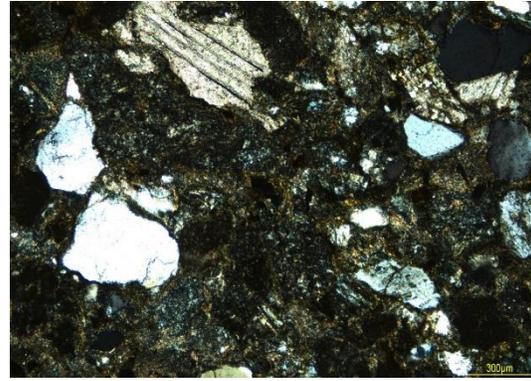


Figura 26. Lámina LBA-20-4: Litofeldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

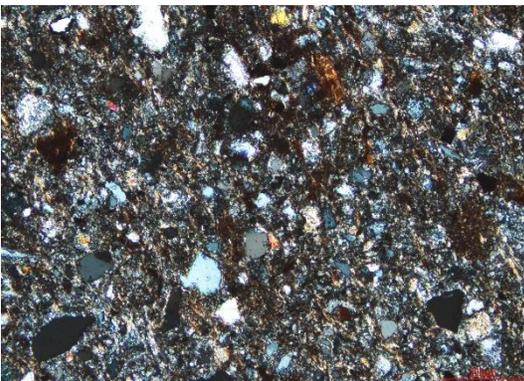


Figura 24. Lámina LB-09-3: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 10x.

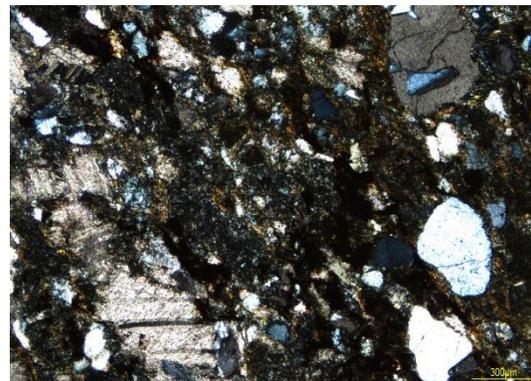


Figura 27. Lámina LBA-20-4b: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

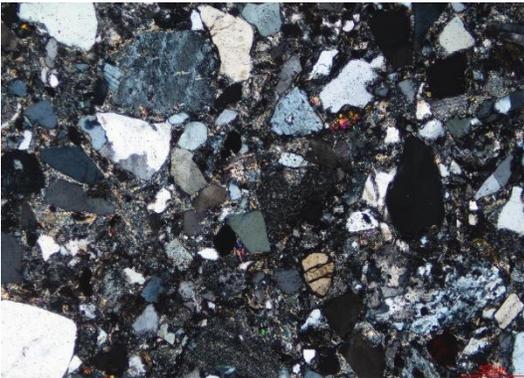


Figura 25. Lámina LB-09-31: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

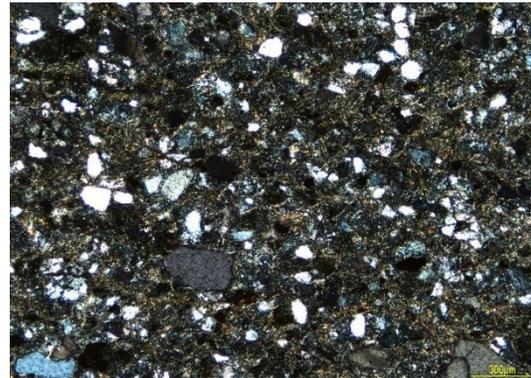


Figura 28. Lámina LBA-20-4b1: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

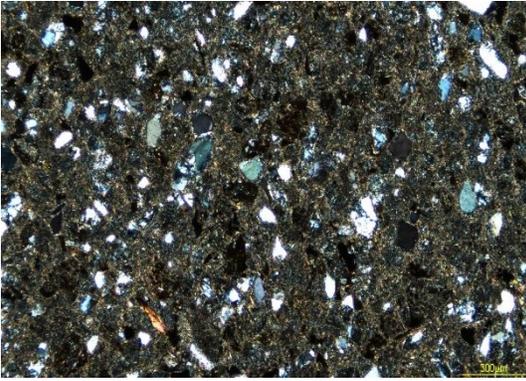


Figura 29. Lámina LBA-20-5: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

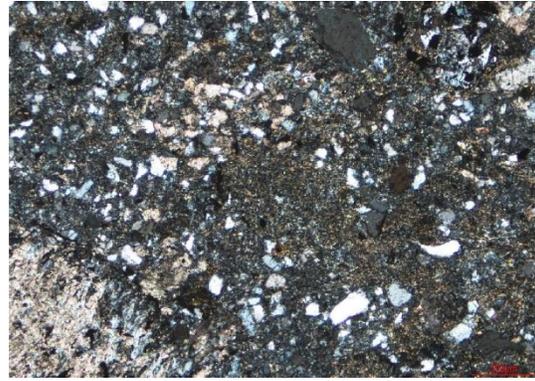


Figura 31. Lámina LBA-21-2 con luz polarizada, objetivo 5x.

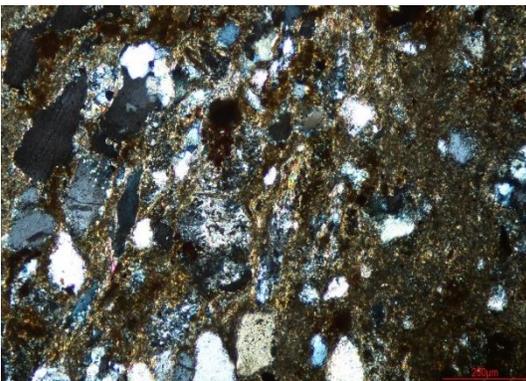


Figura 30. Lámina LBA-21-1: NOMBRE, con luz polarizada, objetivo 10x.

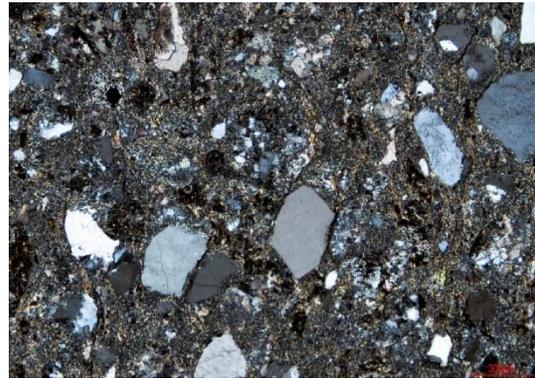


Figura 32. Lámina LBA-21-5 con luz polarizada, objetivo 5x.

PETROFACIES B:

Se tratan de rocas de tipo areniscas, clasificadas como cuarzo-feldespáticas y corresponden a las claves: LB-06-2, LBA-21-3 y LBA-21-4.

Son rocas sedimentarias clásticas con componentes de tamaño de grano medio a grueso principalmente, de feldespatos, cuarzos, líticos y algunos minerales accesorios en orden de abundancia, se encuentran soportados en una matriz arcillo-arenosa menor al 30% y en ocasiones presentan cemento carbonatado. Los feldespatos se tratan en su mayoría de tipo alcalinos más que plagioclasas, presentes en cristales subhedrales a euhedrales de grano grueso, en ocasiones con macla Carlsbad o polisintética, se identifica microclina y se encuentran fuertemente alterando a sericita. El cuarzo se presenta en cristales de grano medio, subhedrales, monocristalinos con extinción recta más que ondulada con estrías y bordes de reacción, policristalinos mayores a 3 cristales en contacto grano a grano con extinción individual y bordes suturados, también se presentan de tipo metamórficos recrystalizados y esquistosos. Los líticos son minoría y se identifican de tipo sedimentarios de areniscas y félsicos?. Los minerales accesorios son tipo ferromagnesianos, opacos y óxidos no identificados, dolomita, moscovita, calcita y sericita. En la muestra LBA-21-4 se identificó un circón de grano medio. En ocasiones las rocas presentan zonas alteradas por oxidación. Figuras 33-35.

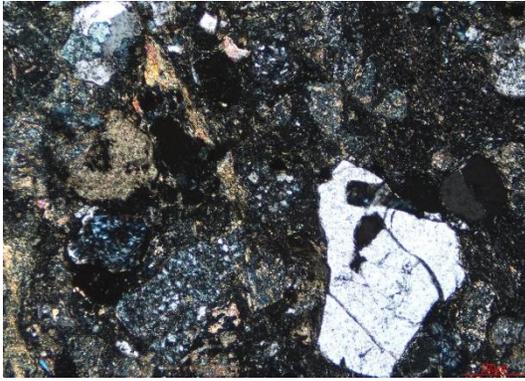


Figura 33. Lámina 06-2: Cuarzo-feldespática, con luz polarizada, objetivo 5x.

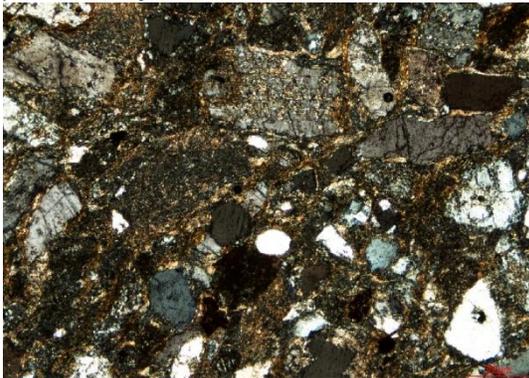


Figura 34. Lámina LBA-21-3 con luz polarizada, objetivo 5x.

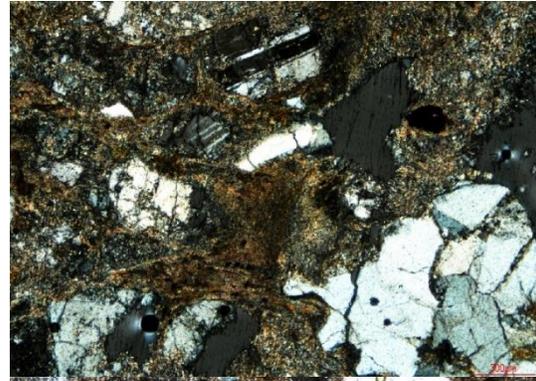


Figura 35. Lámina LBA-21-4 con luz polarizada, objetivo 5x, en la imagen inferior se muestra un circón.

PETROFACIES C:

Rocas de tipo areniscas clasificadas como cuarcitas, es la petrofacies menos repetitiva a la que corresponden las claves LBA-13-7 y LBA-207.

Se tratan de rocas sedimentarias clásticas que varían en su tamaño de grano de fino a grueso, compuestas en orden de abundancia, por cuarzo, feldespatos, líticos y minerales accesorios en una matriz arcillosa alterada del 15% aproximadamente. El cuarzo se presenta en cristales de grano fino a grueso, subhedrales a anhedrales, monocristalinos con extinción recta mayor que ondulada y los policristalinos son mayores a 3 cristales en contacto grano a grano con extinción individual y bordes suturados a rectos o granulares, en ocasiones presentan estrías, también se identifican de tipo metamórfico recristalizado y esquistoso. Los feldespatos se encuentran presentes en cristales de grano medio, subhedrales, alcalinos más que plagioclasas y están alterando a sericita. Los líticos están prácticamente escasos, pero se identificaron algunos de tamaño fino de tipo sedimentarios de areniscas. Los minerales accesorios están presentes en cristales de grano medio principalmente, variando a fino, subhedrales a anhedrales de piroxenos, opacos, pirita con bordes de oxidación, y algunos no identificados, probable moscovita y biotita. Figuras 36 y 37.

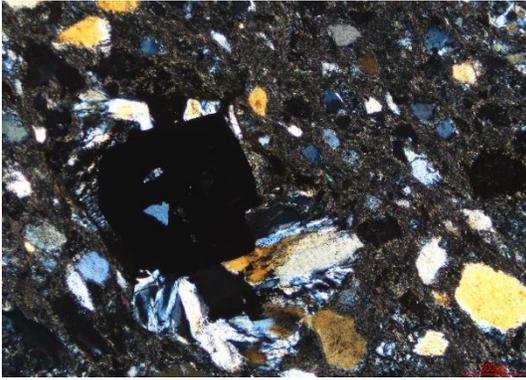


Figura 36. Lámina LBA-13-7. Arenisca cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x

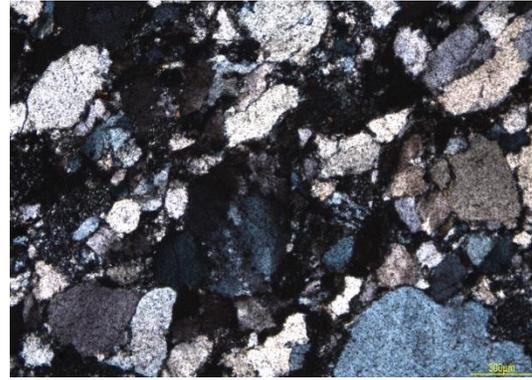


Figura 37. Lámina LBA-20-7: Feldespato-cuarzosa, con luz polarizada, objetivo 5x.

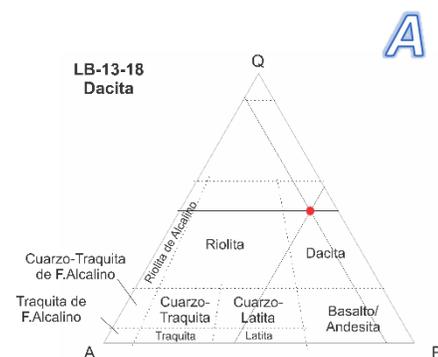
3.1.2. Serie de brechas y conglomerados

LB-13-18

Roca sedimentaria clástica (brecha volcánica o volcanoclástica) compuesta por clastos volcánicos de granos finos a muy gruesos de cuarzo, plagioclasas, calcita, y algunos cristales de anfíboles, piroxenos y minerales opacos, emergidos en una matriz microlítica de plagioclasas con textura afieltrada y en ocasiones la matriz aparenta tener una textura fluidal, también presenta cementante carbonatado. Los fenocristales de cuarzo se presentan subhedrales, de tipo policristalinos más que los monocristalinos, con extinción individual recta más que ondulada, contacto grano a grano con bordes suturados, algunos de estos cristales presentan estrías o fracturas rellenas en ocasiones de calcita. Los cristales de feldespato y plagioclasa van de subhedrales a anhedrales; con el método de Michel-Levy se pudieron identificar que la mayoría de las plagioclasas corresponden a oligoclasa o andesina ($18-33^\circ$) con la presencia de macla simple o tipo polisintética. Los cristales de calcita se encuentran alterados presentando colores de interferencia altos y en ocasiones está relleno de fracturas, y los de dolomita presentan foliación. Los cristales de piroxenos y anfíboles no son identificados, se presentan en muy baja proporción, en ocasiones aparentan formar parte de la matriz acompañando a las plagioclasas y feldespatos. Presenta también minerales opacos diseminados. La matriz es microlítica compuesta por microcristales de plagioclasa (andesina). El diagrama que se muestra en la figura 38 A corresponde al diagrama de los componentes volcánicos, mientras que, en la B, se muestra una imagen general de la roca con otros componentes sedimentarios.

Composición:

Cuarzo	44%	49%
Plagioclasas	38%	42%
Fpato. Alcalino	8%	9%
Calcita y dolomita	5%	
Min Opacos	4%	
Piroxenos	1%	
Anfíboles	1%	



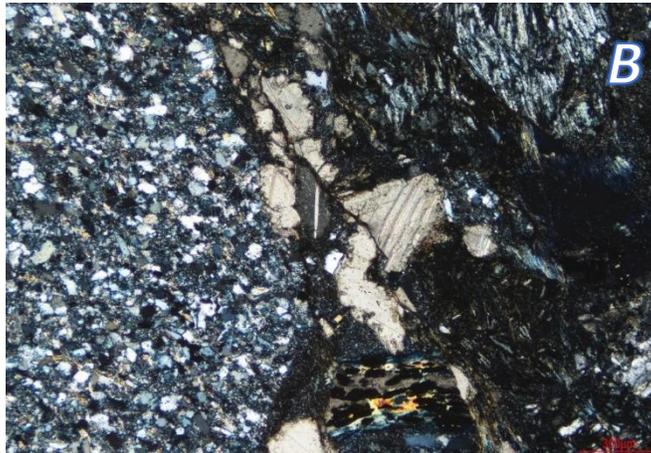


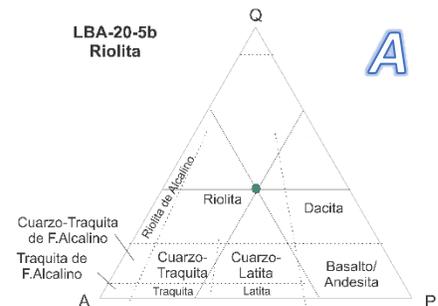
Figura 38. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para los clastos volcánicos de la muestra LB-13-18. B: Lámina LB-13-18: Brecha volcánica, con luz polarizada, objetivo 5x.

LBA-20-5b

Roca sedimentaria clástica (brecha) que contiene clastos de grano medio a muy grueso angulosos a subredondeados, compuestos de rocas volcánicas, areniscas y cristales de cuarzo, feldespatos, calcita y líticos en una matriz hipohialina con microcristales de plagioclasas y clinopiroxenos. Los fragmentos presentes se tratan de areniscas de grano muy fino compuesta por microcristales de cuarzo mono y policristalino, en ocasiones de tipo metamórfico y feldespatos que están alterando generalmente a sericita, en una matriz arcillosa; líticos de tipo sedimentario carbonatado, la calcita es subhedral y presenta macla polisintética, el cuarzo se presenta en fenocristales subhedrales de grano medio, frecuentemente presentan estrías y abundan más los de tipo monocristalino que los policristalinos. Los feldespatos feldespatos van de grano medio a grueso, subhedrales; algunos se encuentran alterando a sericita. Las plagioclasas van de grano fino a grueso, subhedrales, se identifican como oligoclasa-andesina. Los anfíboles son de grano fino, anhedrales. Los minerales accesorios son subhedrales a anhedrales, se identifican calcita, moscovita y sericita sustituyendo a feldespatos en ocasiones. La matriz es afánítica a microlítica, se identifican microcristales de plagioclasas en su composición. En la figura 39 A se muestra la composición de los fragmentos volcánicos en la roca.

Composición:

Cuarzo	20%	40%
Fpato. alcalino	15%	30%
Plagioclasas	15%	30%
Anfíboles	7%	
Min. accesorios	3%	
Matriz	40%	



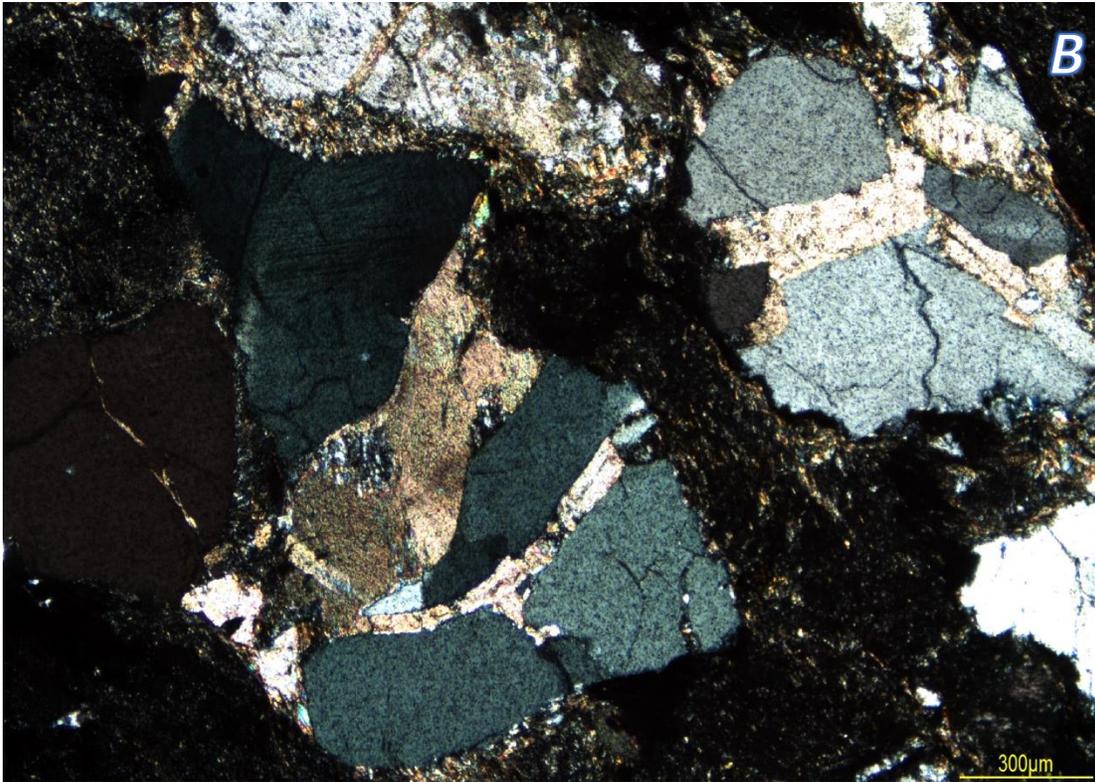


Figura 39. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca LBA-20-5b. B: Lámina LBA-20-5b con luz polarizada, objetivo 5x.

LBA-20-6

Se trata de una brecha volcánica que contiene clastos del tamaño de arenas medias hasta bloques angulosos a subredondeados, compuestos de rocas volcánicas, areniscas y cristales de cuarzo, feldespatos, calcita, sericita y accesorios, emergidos en una matriz arcillosa mayor al 10% y en ocasiones en cementante carbonatado. Los fragmentos presentes se tratan de andesita, roca intermedia compuesta por fenocristales de plagioclasas, clinopiroxenos, augita y en ocasiones se presenta carbonato relleno de vesículas (amigdaloides) en matriz hipohialina; andesita glomerophyrica, compuesta por fenocristales de plagioclasas en matriz de plagioclasas más finas y opacas; basalto, roca máfica compuesta por microcristales de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en matriz holohialina; arenisca, roca sedimentaria de grano fino a medio compuesta de cuarcos, feldespatos y líticos en una matriz menor al 30%, sin componentes volcánicos, en ocasiones presenta cemento calcáreo y sílice policristalino; cuarzo presente en mono y policristales subhedrales a anhedrales de grano fino a grueso, en ocasiones se presenta como tipo metamórfico en cristales gruesos de cuarzo recrystalizado; feldespatos de grano fino a medio, presentes más las plagioclasas que los alcalinos en cristales subhedrales que en ocasiones se encuentran alterando a sericita. Figura 40.

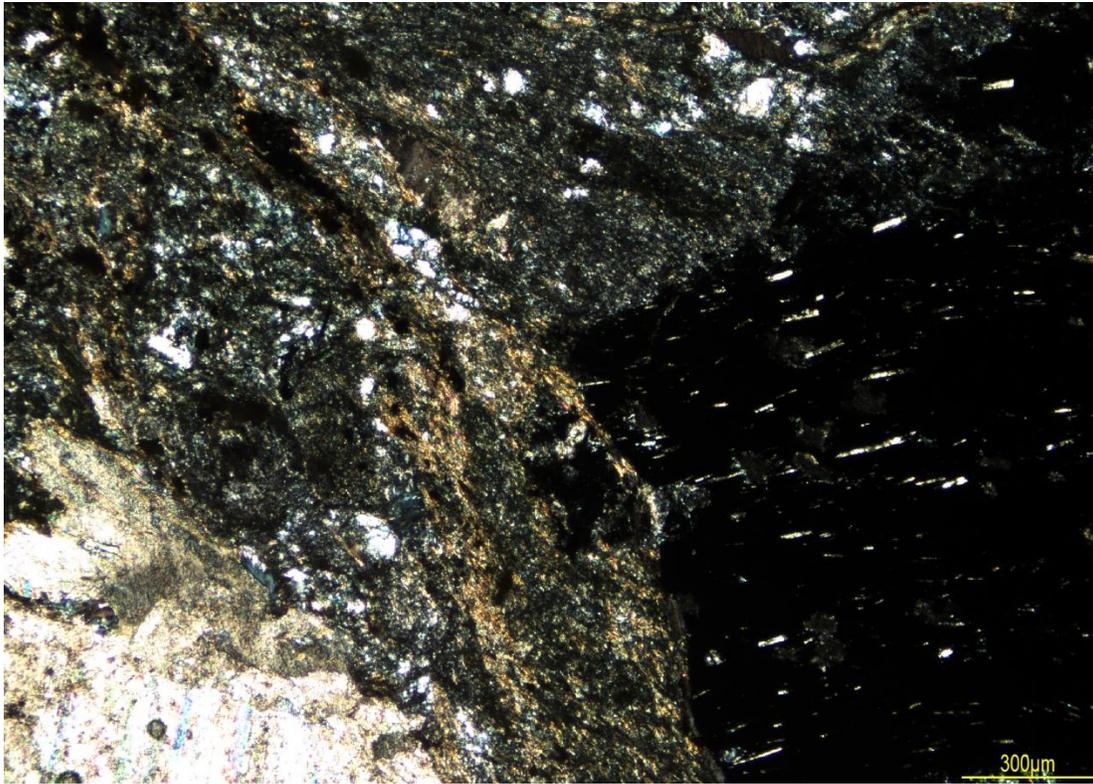


Figura 40. Lámina LBA-20-6 volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 5x.

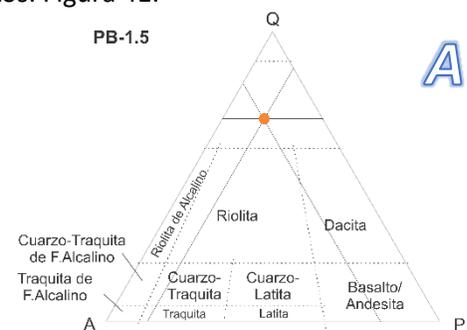
PB-1.5

Roca sedimentaria clástica con componentes volcánicos (volcanoclástica) contiene baja proporción de fenocristales de cuarzo, feldespatos, minerales opacos y algunos ferromagnesianos no identificados, emergidos en matriz arcillosa con alto porcentaje de vidrio y vacuolas.

Los cristales de cuarzo son de grano muy fino a fino, subhedrales, monocristalinos en su mayoría, con extinción recta y los policristalinos son de grano medio con extinción individual recta, contacto grano a grano y bordes suturados. Los feldespatos van de grano fino a muy fino, subhedrales, aparentar ser parte de la matriz. Los minerales opacos y ferromagnesianos se encuentran en cristales anhedrales, no identificados, de grano fino. La matriz es afanítica y no se logran identificar sus componentes, probablemente se traten de minerales félsicos en una etapa de alteración, ya que con luz polarizada presentan ligero pleocroísmo de colores de orden bajo a medio en tonalidades amarillentas; inclusive algunos cristales de cuarzo también presentan colores de rango más bajo (amarillo-blanco). Probablemente se trate de sericitización en feldespatos. Figura 41.

Composición:

Matriz	80%	
Cuarzo	12%	70%
Fpato. alcalino	3%	18%
Plagioclasas	2%	12%
Min. Opacos	2%	
Min. FeMg	1%	



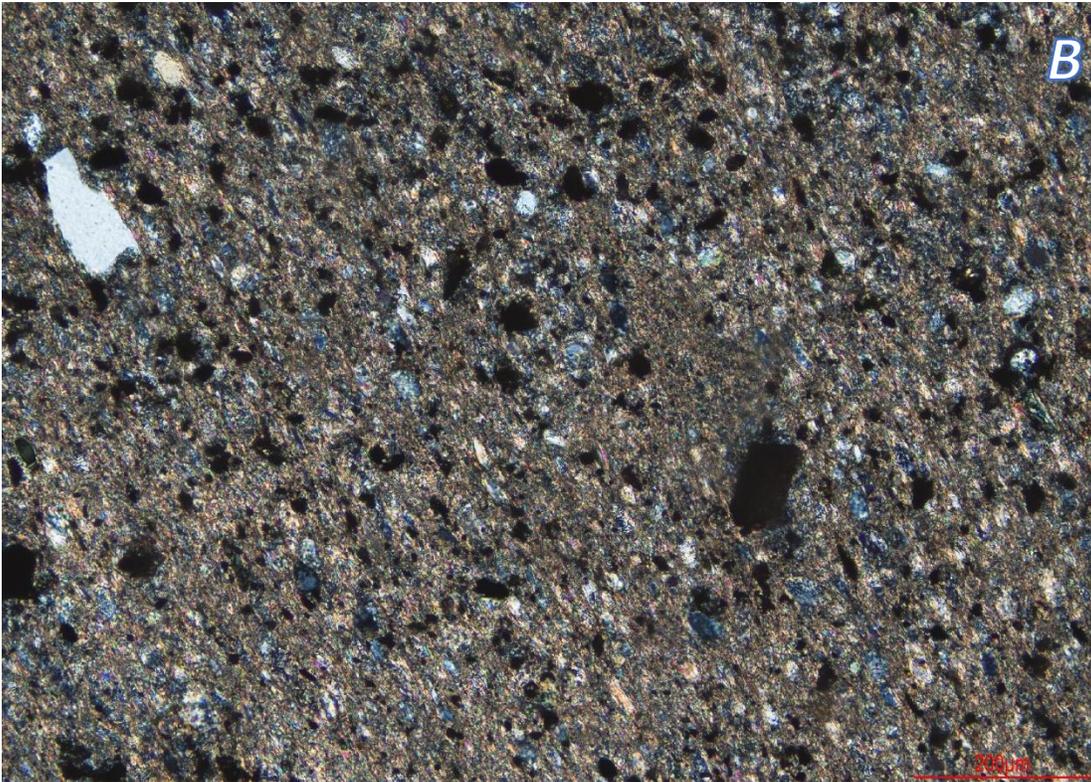


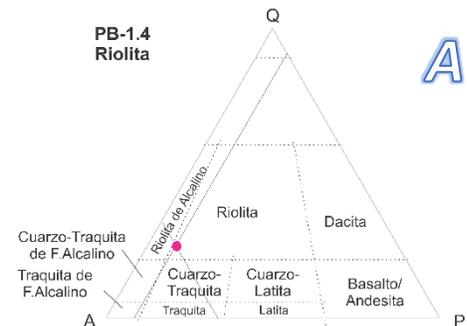
Figura 41. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca PB 1.5. B: Lámina PB1.5: Roca volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 10x.

PB-1.4

Roca sedimentaria clástica con componentes volcánicos (brecha volcánica o volcanoclástica) de granos muy finos a medios con clasificación moderada de matriz con contenido vítreo y feldespatos alterándose a sericita menor al 30%. Presenta fenocristales de cuarzo, calcita, piroxenos, minerales opacos y ferromagnesianos no identificados. Los cristales de cuarzo monocristalino son de grano muy fino a fino con extinción recta más que ondulada, subhedrales a anhedrales, los policristalinos son de grano medio, subhedrales, con extinción individual, contacto grano a grano y bordes suturados. Los cristales de feldespatos son de grano muy fino a medio, en ocasiones forman parte de la matriz, y se encuentran alterados por sericitización, las plagioclasas presentes son minoría. Los cristales de calcita van de grano fino a medio, de subhedrales a anhedrales, en ocasiones aparentan formar parte de la matriz. Los microcristales de piroxenos son de grano muy fino, subhedrales, probablemente se trate de Augita. Los minerales opacos van de finos a gruesos, anhedrales, probablemente se trate de magnetita. Los minerales ferromagnesianos se encuentran como agregados y no se logran identificar, presentan colores de interferencia pardos en LN y LP, en ocasiones rodean el borde de algunos otros granos, como formando parte de algún tipo de alteración. Figura 42.

Composición:

Fpato. alcalino	40%	67%
Calcita	22%	
Cuarzo	15%	25%
Min. opacos	10%	
Plagioclasas	5%	8%
Piroxenos	5%	
Óxidos	3%	



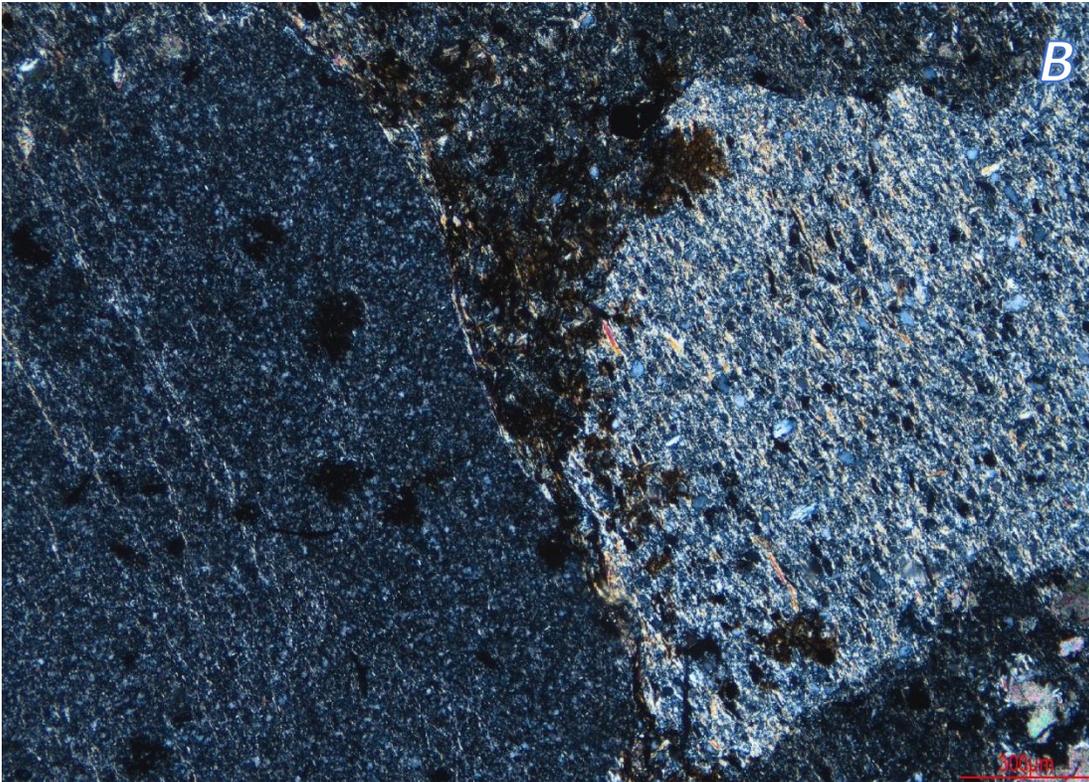


Figura 42. A: Diagrama de clasificación de los componentes volcánicos para la roca PB-1.4. B: Lámina PB-1.4. Roca volcanoclástica, con luz polarizada, objetivo 5x.

LBA-13-13

Roca sedimentaria clástica (brechas) con componentes clasto-carbonatados que varían de granos finos a gruesos de cuarzo, feldespatos, opacos y minerales ferromagnesianos no identificados en cementante calcáreo mayor al 15%. Los cristales de cuarzo monocristalino son subhedrales con extinción recta más que la ondulada, los policristalinos son mayores a 3 cristales con extinción individual, contacto grano a grano con bordes rectos a suturados; en ocasiones presentan estrías. Los feldespatos son de grano fino a medio, subhedrales, en ocasiones se alteran a sericita. Se presentan minerales opacos y algunos ferromagnesianos no identificados, anhedrales (biotita?). Figura 43.

Composición:

Matriz	50%
Cuarzo	30%
Feldespatos	14%
Min. opacos	3%
Min. accesorios	3%

Nota: Los cristales están alterados o la lámina no tiene el grosor adecuado.

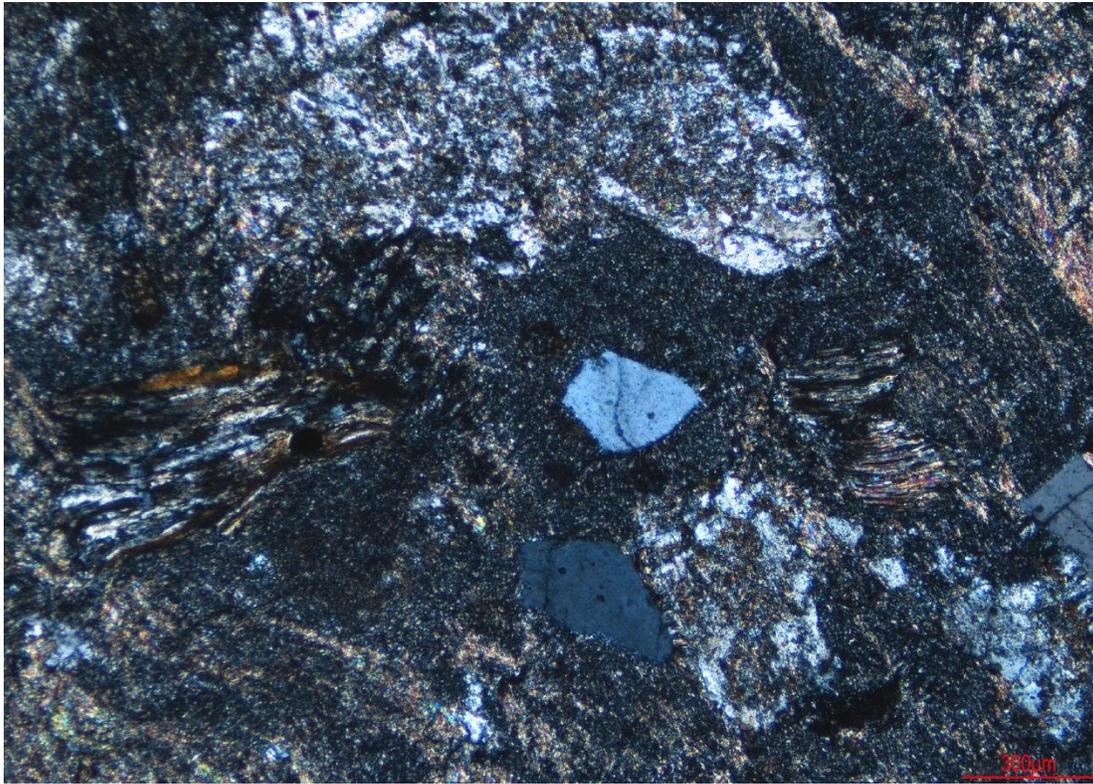


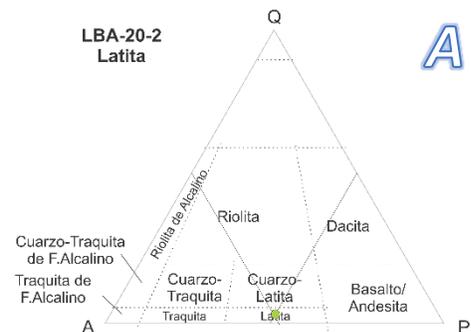
Figura 43. Lámina LBA-13-13: Roca sedimentaria clasto-carbonatada?, con luz polarizada, objetivo 5x.

LBA 20-2

Roca sedimentaria clástica con componentes volcánicos (brecha volcánica – volcanoclástica) compuesta por fenocristales de grano muy fino a grueso de calcita, dolomita, cuarzo, minerales ferromagnesianos y opacos en una matriz mayor al 30% de feldspatos y plagioclasas en cierto grado de alteración. Los cristales de calcita y dolomita son los más abundantes después de los contenidos en la matriz, se presentan subhedrales a anhedrales de grano medio a grueso, en ocasiones presentan maclado polisintético característico de la dolomita y aparentan también rellenar cavidades de otros cristales preexistentes. Se presentan minerales ferromagnesianos anhedrales, que probablemente se traten de anfíboles. Los minerales opacos son anhedrales y no se logran identificar. Los fenocristales de cuarzo no abundan, se identifican como monocristalinos subhedrales con extinción recta mayor que ondulada, en granos finos y presentan estrías en ocasiones. La matriz es prácticamente el contenido principal de la roca con cristales subhedrales a anhedrales de grano fino a medio de feldspatos y plagioclasas que se encuentran fuertemente alterando a sericita?. Figura 44.

Composición:

Matriz (Fpato 38%-Pg37%)	75%	F.A.49% Pg. 48%
Calcita y dolomita	15%	
Min. ferromagnesianos	6%	
Cuarzo	2%	3%
Min. Opacos	2%	



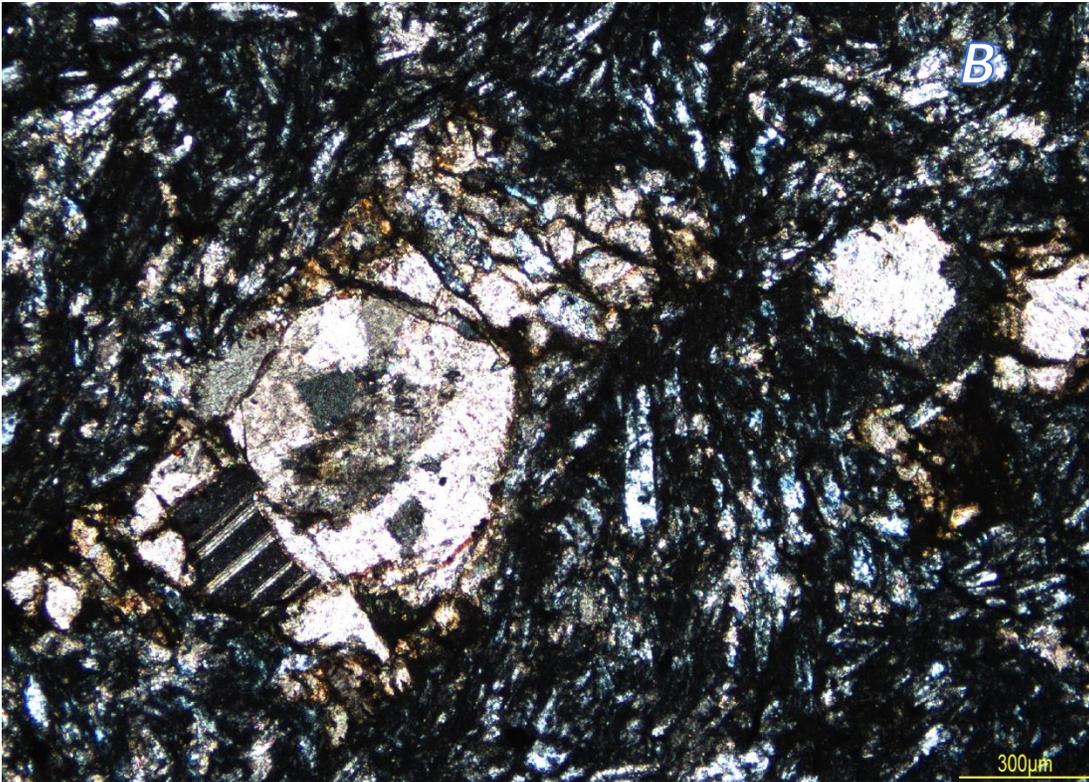


Figura 44. A: Diagrama de clasificación para los componentes volcánicos de la roca LBA-20-2. B: Lámina LBA-20-2, con luz polarizada, objetivo 5x.

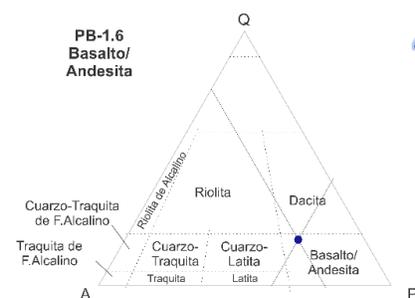
3.1.3. Serie de rocas volcánicas

PB-1.6

Roca ígnea extrusiva que aparenta tener textura fluidal con fenocristales de plagioclasas en abundancia desde grano muy fino, identificadas entre andesina y oligoclasa en su mayoría; presenta también feldespatos, anfíboles en menor proporción minerales opacos y óxidos. Los cristales de feldespato alcalinos se encuentran en una etapa de alteración y algunos inmersos en la matriz con las plagioclasas. Las plagioclasas presentan macla simple o polisintética tipo Carlsbad y se identifican como andesina u oligoclasa. Los cuarzos se encuentran presentes en monocristales de grano fino inmersos en la matriz, la mayoría presentan extinción recta y estrías ocasionalmente. Los cristales de anfíboles no se identifican, porque son anhedrales deformados, aparentemente relleno de cavidades de la roca. La mayoría de los óxidos se encuentran de grano fino, pero algunos otros van de medios a gruesos, están dispersos en toda la roca, así como algunos minerales opacos. Figura 45.

Composición:

Plagioclasas	50%	59%
Fpato. Alcalino	20%	23%
Cuarzo	15%	18%
Anfíboles	10%	
Óxidos	3%	
Min. Opacos	2%	



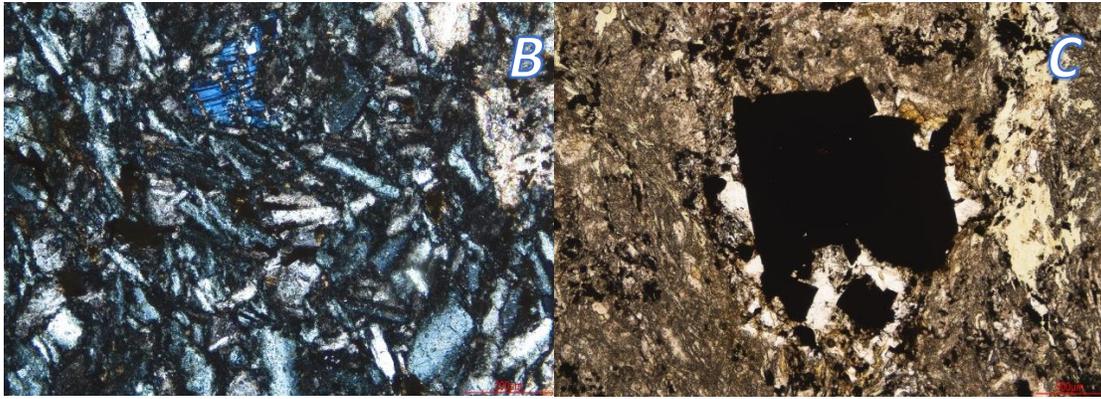


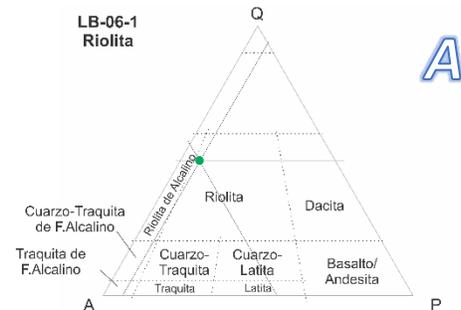
Figura 45. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB-1.6. B: Lámina PB-1.6: Basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 10x. C: Lámina PB-1.6: Basalto/andesita, con luz natural, objetivo 5x.

L13-06-1

Roca ígnea extrusiva con presencia de fenocristales de cuarzo, feldespatos y plagiocasas, en ocasiones se presenta clorita como mineral accesorio. Los cristales de cuarzo varían de grano grueso a muy grueso, los de tipo monocristalinos son minoría, presentan extinción recta y en ocasiones estrías; los policristalinos son granos recristalizados subhedrales a anhedrales aparentemente sustituyendo a otros minerales (probablemente otros cuarzos y/o feldespatos), presentan colores de orden alto, por lo que se cree que están fuertemente alterados. Los cristales de feldespato alcalino van de grano medio a grueso de euhedrales a subhedrales, se encuentran fuertemente alterados, presentando sericitización e incluso algunos presentan textura poquilítica, siendo los feldespatos los oikocristales y las inclusiones de cristales de cuarzo o clorita en ocasiones. Los cristales de plagioclasa son de grano medio, subhedrales, se identificaron como andesina, se encuentran presentes en muy baja proporción. Como mineral accesorio se identifica la clorita. La matriz es de tipo afanítica de composición felsítica?. Figura 46.

Composición:

Matriz	70%	
Cuarzo	14%	47%
Fpato. alcalino	14%	47%
Plagioclasas	2%	6%



Nota: Los cristales están alterados o la lámina no tiene el grosor adecuado.

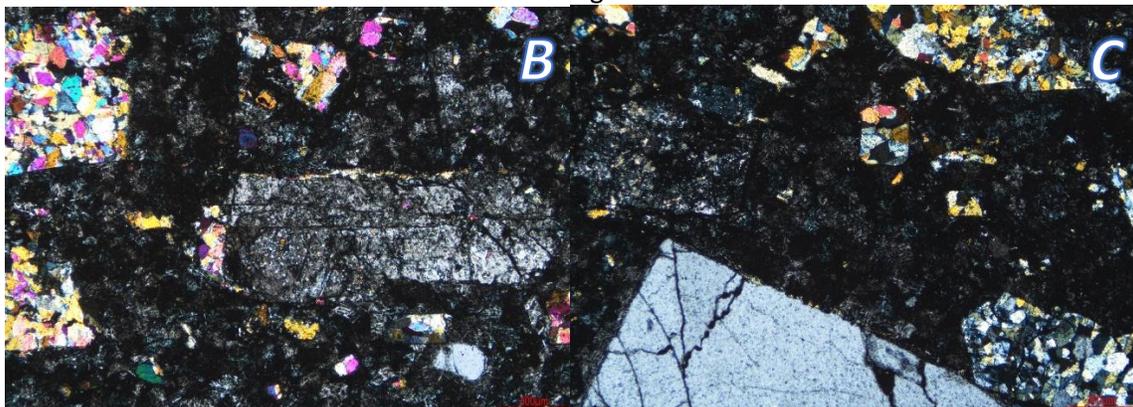


Figura 46. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca L13-06-1. B: Lámina L13-06-1: Riolita, con luz polarizada, objetivo 5x. C: Lámina L13-06-1: Riolita, con luz polarizada, objetivo 5x.

PB-1.3C

Roca ígnea extrusiva con baja presencia de fenocristales de cuarzo, feldespatos y opacos no identificados, emergidos en una matriz microlítica con alto porcentaje de vidrio y numerosos cristales de grano muy fino de feldespatos y plagioclasas comúnmente en etapa de alteración a sericita.

Los cristales de cuarzo son subhedrales, mayormente se presentan en monocristalinos con extinción recta más que la ondulada, los policristalinos se presentan mayores a 3 cristales con extinción individual recta, contacto grano a grano y bordes suturados. Los feldespatos se encuentran fuertemente alterados, presentes en la matriz. Los minerales opacos se presentan en cristales anhedrales, no identificados. La sericita presente está reemplazando a feldespatos en fenocristales y microcristales en la matriz. Figura 47.

Composición:

Matriz	70%	
Cuarzo	20%	80%
Fpato. alcalino	3%	12%
Sericita	3%	
Plagioclasas	2%	8%
Min. Opacos	2%	

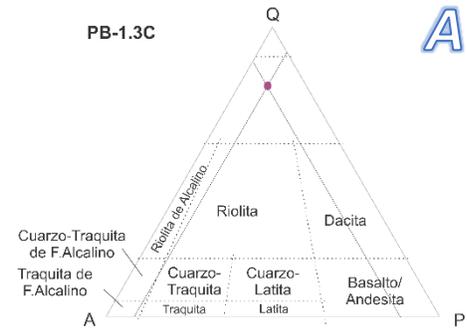


Figura 47. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3C. B: Lámina PB1.3C: Roca ígnea con alto contenido de cuarzo, con luz polarizada, objetivo 10x.

PB-TR-N

Roca ígnea con fenocristales de piroxenos, ferromagnesianos (óxidos), calcita, cuarzo y opacos (magnetita), en una matriz microlítica formada por feldespatos que casi en su totalidad se tratan de plagioclasas.

Los cristales de clinopiroxenos son de grano muy fino, subhedrales y algunos se presentan en forma prismática, probablemente se trate de augita. Los ortopiroxenos son de grano fino a medio, subhedrales a anhedrales, que a luz natural (LN) presentan colores cafés con tonalidades amarillentas a rojizas y con LP presentan colores de orden bajos y altos de amarillos a grises o blancos, en ocasiones se ven más oscuros. Los cuarzos son principalmente policristalinos mayores a 3 cristales de grano muy fino a fino, subhedrales con extinción individual recta, contacto grano a grano con bordes suturados a rectos. La calcita se presenta en cristales subhedrales de grano medio con macla laminar de deformación, parcialmente recristalizada. Los minerales opacos son de grano fino, anhedrales, probablemente se trate de magnetita. La matriz es compuesta de feldespatos plagioclasa en su mayoría, exhiben textura afieltrada. Figura 48.

Composición:

Matriz (Fpato-Pg)	70%	76%
Ortopiroxenos	12%	13%
Clinopiroxenos	10%	11%
Nefelina	3%	
Calcita	3%	
Min. Opacos	2%	

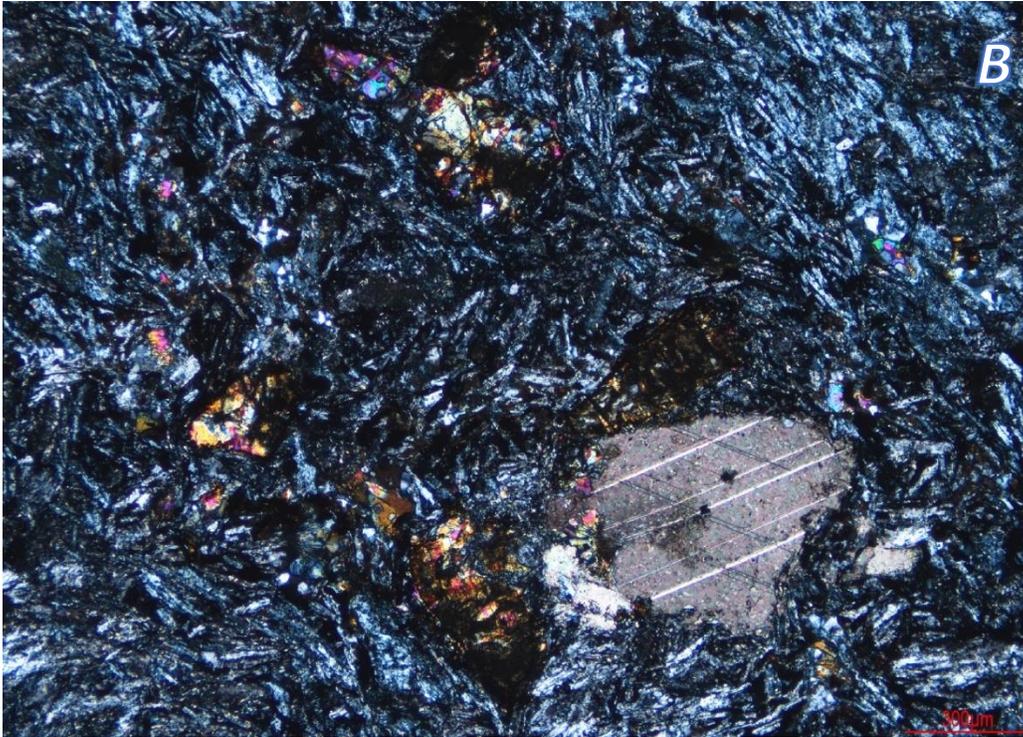
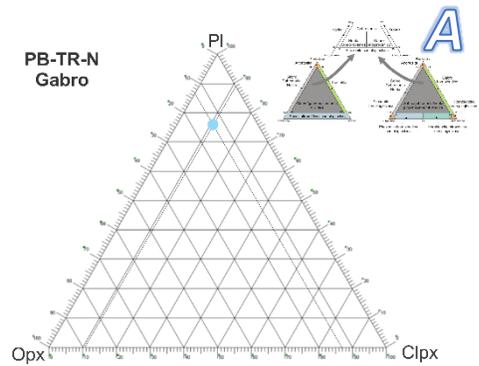


Figura 48. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3C. B: Lámina PB-TR-N: Gabro?, con luz polarizada, objetivo 5x.

PB-1.3d

Roca ígnea extrusiva compuesta de granos muy finos a medios, que aparentan ser oquedades rellenas de cristales de cuarzo rodeados por microcristales de plagioclasas. Se presentan minerales accesorios, que aparentan ser cálcicos, probablemente calcita.

Los fenocristales de cuarzo son de tipo policristalino mayores a 3 cristales con extinción individual ondulada a recta, contacto grano a grano con bordes suturados y están relleno de oquedades de minerales de grano fino, con bordes de alteración que aparentan ser anfíboles, subhedrales a anhedrales. Los minerales accesorios se presentan en cristales de grano fino, aparentan ser calcita y en ocasiones presentan macla de deformación característica de este mineral. La matriz está compuesta casi en su totalidad de feldespatos y plagioclasas, predominando estos últimos, muestran textura afieltrada. Figura 49.

Composición:

Plagioclasas	72%	74%
Fpato. alcalino	15%	16%
Cuarzo	10%	10%
Min. accesorios	3%	

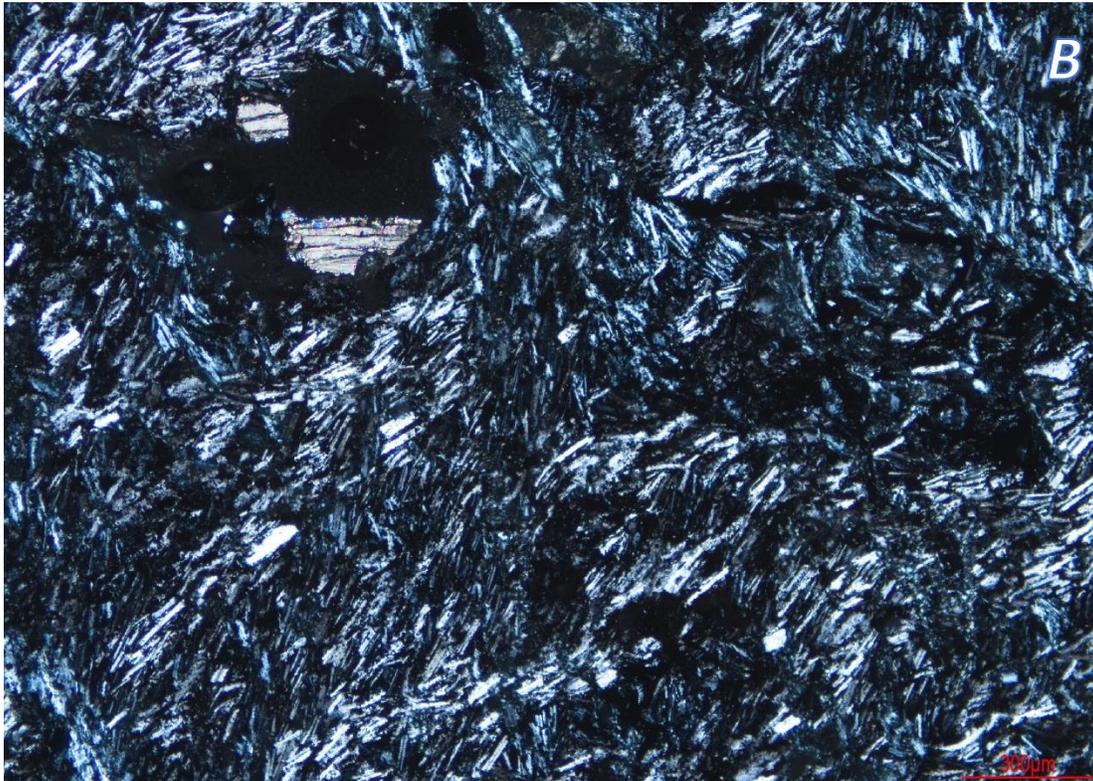
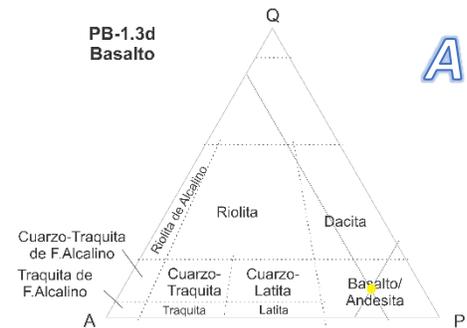


Figura 49. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3d. B: Lámina PB1.3d: Basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 5x.

PB 1.3d (intrusión)

Roca ígnea extrusiva con granos muy finos a medios que aparentan ser oquedades de feldspatos, y los cuales están rellenos de cuarzo policristalino, inmersos en una matriz microlítica compuesta de plagioclasas principalmente y de minerales alterados no identificados, probablemente se traten de feldspatos en etapa de sericitización; también los hay en fenocristales de grano muy fino a medio que exhiben mejor la alteración. Presenta minerales opacos (magnetita?) y minerales ferromagnesiados que también exhiben alteración (uralitización?, en augita).

La roca presenta intrusión de una roca con textura de grano fino a muy fino, con microcristales de cuarzo, anhedral con contactos suturados y extinción ondulada más que recta. Presenta cristales de grano medio, anhedral de colores pardos a cafés en LN y LP con algunos otros de orden más alto que están alterados (uralitización?) y feldspatos en etapa de sericitización. Figura 50.

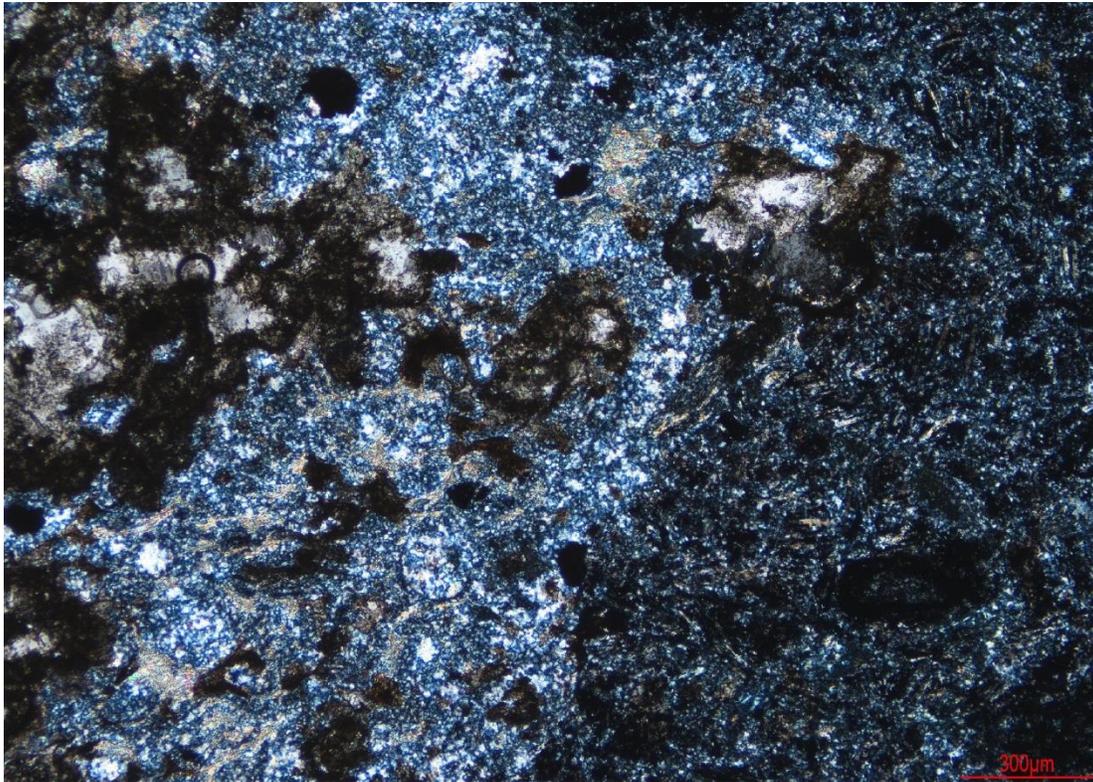


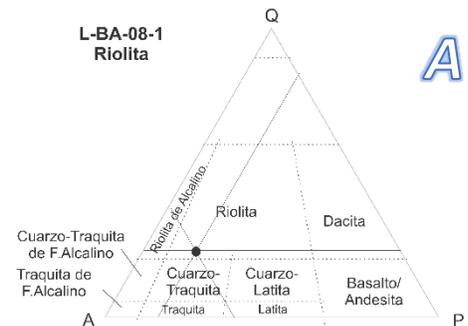
Figura 50. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca PB1.3d (intrusión). B: Lámina P-B1.3d (intrusión), basalto/andesita, con luz polarizada, objetivo 5x.

L-BA-08-1

Roca ígnea extrusiva con fenocristales de grano muy fino a medio de cuarzo, feldespatos, piroxenos, opacos y algunos óxidos como accesorios; emergidos en una matriz afanítica de probables feldespatos alterados (sericita). El cuarzo se presenta como un mineral agregado esferulítico criptocristalino, en cristales policristalinos subhedrales con extinción individual ondulada, contacto grano a grano y bordes suturados. Los feldespatos varían de grano fino a medio, subhedrales, alterando a sericita. Los piroxenos son de grano fino a muy fino, en cristales subhedrales; así como los minerales opacos. Figura 51.

Composición:

Matriz	61%	
Min. opacos	15%	
Fpato. alcalino	8%	62%
Piroxenos	8%	
Cuarzo	3%	23%
Min. accesorios	3%	
Plagioclasas	2%	15%



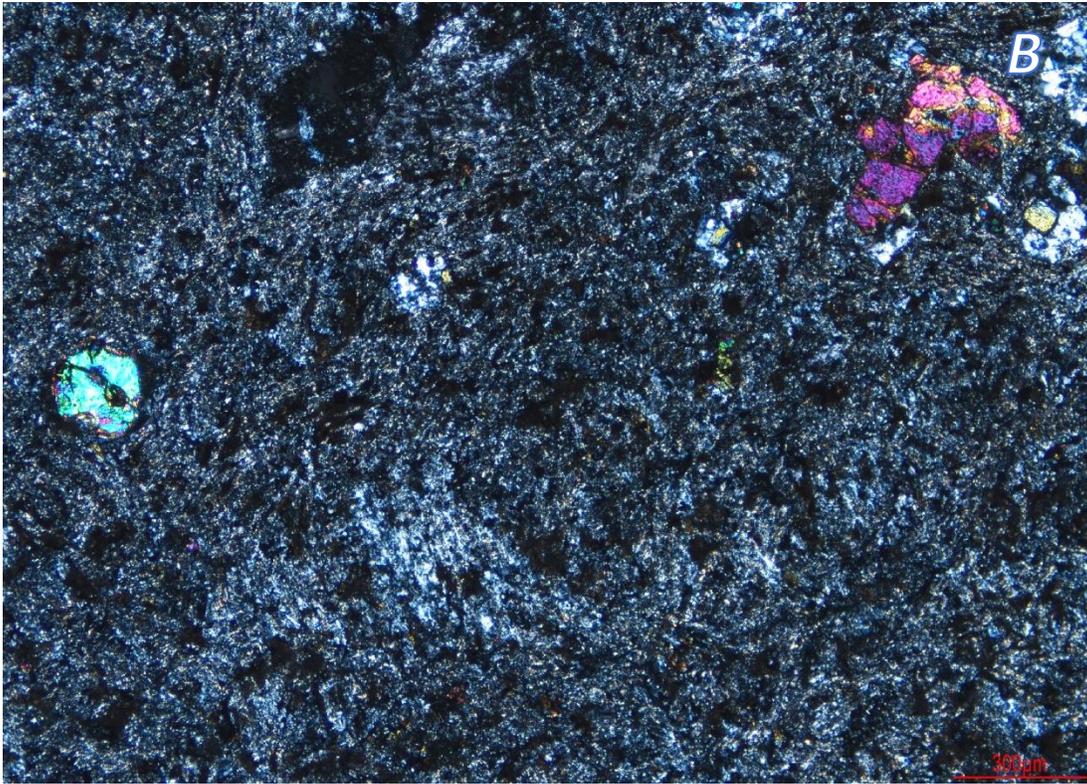


Figura 51. A: Diagrama de clasificación de rocas ígneas para la roca L-BA-08-1. B: Lámina L-BA-08-1. Riolita?, con luz polarizada, objetivo 5x.

VAR-07-20

Roca ígnea extrusiva (ceniza volcánica?) con presencia de minerales anhedrales de cuarzo, feldespatos, algunos coloreados no identificados (moscovita?, calcita?) y opacos en granos muy finos. Prácticamente se trata de matriz afanítica con contenido vítreo. Figura 52.

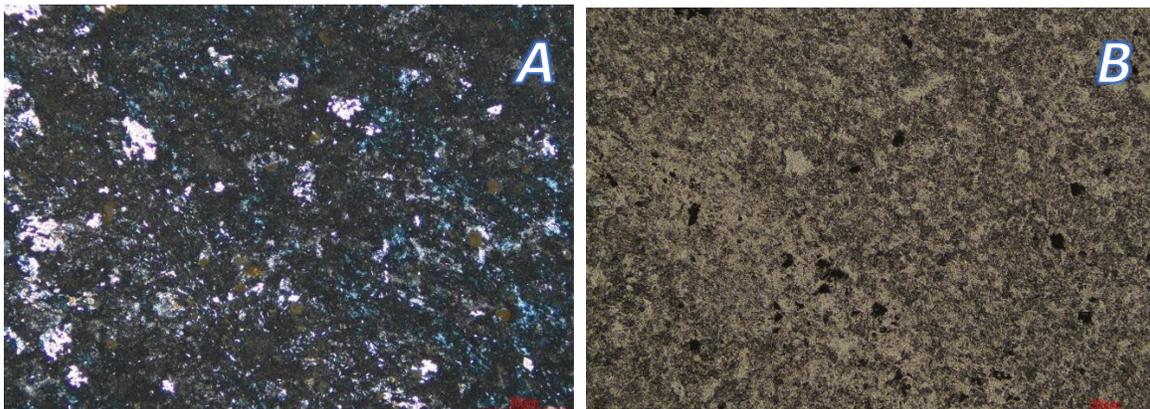


Figura 52. Lámina VAR-07-20: Ceniza volcánica?, (A) luz polarizada y (B) luz natural, objetivo 10x.

Las muestras analizadas de las secuencias jurásicas muestran una variación composicional que apoyó a la división de las rocas en 3 petrofacies, las cuales en orden de abundancia corresponden a: A: Feldespato-cuarzosa (FQ) con 10 rocas, B: Cuarzo-feldespática (QF) con 3 rocas y C: cuarcitas con dos rocas (figura 53). La variación que se muestra en las rocas corresponde prácticamente al contenido de cuarzo presente en cada una, ya que la relación entre feldespatos y líticos es similar entre ellas.

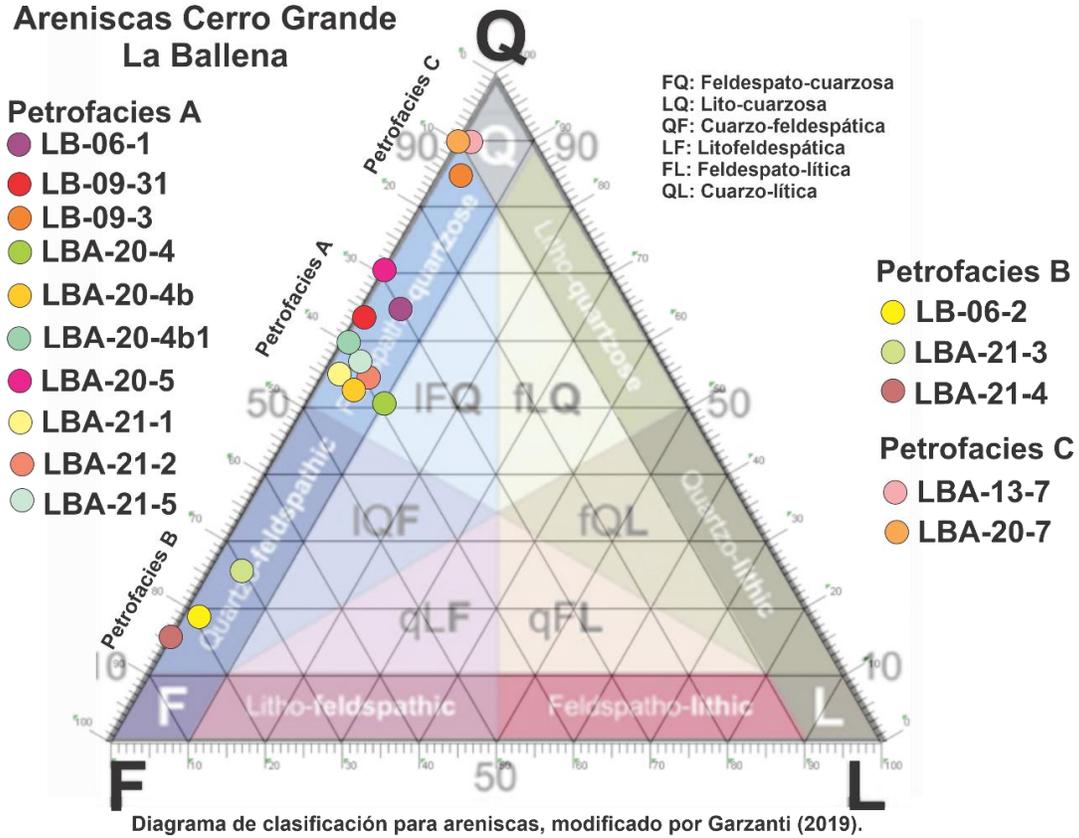


Figura 53. Diagrama de clasificación para las 15 láminas descritas como areniscas agrupadas en petrofacies.

Estas son las rocas que se toman en cuenta para el estudio de procedencia que se describe en el siguiente tema. El uso de diagramas ternarios para clasificar e identificar la procedencia de las areniscas es una herramienta que junto a otras metodologías permite realizar interpretaciones sobre el origen y ambiente tectónico en donde fueron depositadas.

3.2 Análisis de procedencia y ambiente tectónico

Para este análisis, se tomó en cuenta la clasificación de las rocas areniscas dentro del diagrama de ambiente tectónico de Dickinson *et al.* (1983) porque toma en cuenta el cuarzo total, feldespatos y líticos presentes en las rocas. Figura 54.

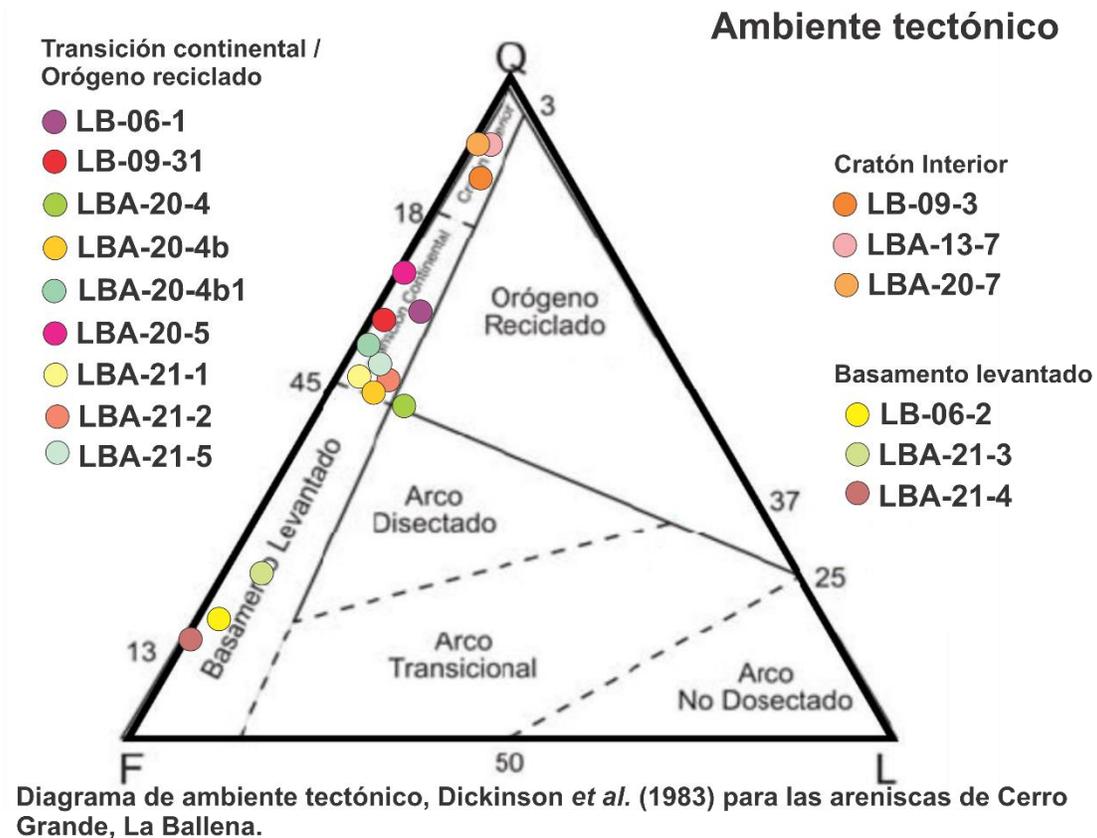


Figura 54. Diagrama de discriminación de ambientes de procedencia para las areniscas del área de estudio.

El diagrama de la figura 54 ayuda a identificar y caracterizar el área fuente o de procedencia en las rocas y así conocer los ambientes tectónicos donde ocurrió su depósito, se observa que las rocas areniscas que corresponden a la petrofacies A: feldespato-cuarzosa que son las más abundantes, pertenecen a un ambiente tectónico de tipo transición continental, la petrofacies B: cuarzo-feldespática a un basamento levantado, y la petrofacies C: cuarzitas a un cratón interior.

En general, el ambiente tectónico de estas rocas está asociado a procedencias de bloques continentales, los medios sedimentarios asociados a una transición continental corresponden a tipo deltaicos, intermareales, costeros, lagunas, playas entre otros y los depósitos de las rocas se asocian a ambientes sedimentarios de plataformas, taludes, abanicos submarinos (partes proximales y medias), en cuanto con la procedencia de un cratón interior o estable, este está asociado a un ambiente tectónico de plataforma estable o del interior del continente y a cuencas de depósito pericratonales y márgenes de rifts continentales, mientras que el basamento levantado se asocia a ambientes tectónicos de bordes de rift o ruptura transforme y a cuencas de depósito marginales antepaís (Dickinson, 1985 y Bathia, 1983).

4.- Geoquímica de Circones de la Formación La Joya

La geoquímica tratada para este capítulo corresponde a los análisis de la concentración de elementos traza, incluida la gama de tierras raras (REE) obtenidos de 75 granos de circones detríticos de la arenisca de la muestra LBA-16-7, recolectada en el área de La Ballena, Zacatecas y procesada para geocronología. (Tabla 2).

Tabla 2. Concentraciones en partes por millón (ppm) de elementos traza en circones de la muestra LBA-16-7.

LBA-16-7									
Circón/ (ppm)	P	Ti	Y	Nb	Hf	Pb	Th	U	Th/U
Zircon_01	-100	10.1	410	2.69	9460	5.13	29	50	0.58
Zircon_02	330	6	1231	3.53	10280	63.00	95	278	0.34173
Zircon_03	1320	2.8	5180	5.11	7790	8.75	392	389	1.00771
Zircon_04	3900	4.7	1245	4.43	9420	3.02	52	112	0.46429
Zircon_05	560	7.5	794	2.03	11260	3.63	110	156	0.70513
Zircon_06	590	3.7	802	1.98	10010	8.55	216	336	0.64286
Zircon_07	1430	2.8	6020	9.77	7360	19.53	695	698	0.9957
Zircon_08	3000	3.9	1499	1.87	10700	8.50	171	316	0.54114
Zircon_09	610	5.3	3110	2.39	7900	9.20	321	220	1.45909
Zircon_10	860	3.2	823	6.13	10620	13.28	254	321	0.79128
Zircon_11	4330	3.4	1770	3.61	9370	27.68	328	495	0.66263
Zircon_12	700	15.4	701	2.57	9040	6.50	24	35	0.68571
Zircon_13	670	2.3	1855	2.81	8710	7.13	162	260	0.62308
Zircon_14	460	1.6	998	1.91	9160	5.00	120	195	0.61538
Zircon_15	1000	9.8	1179	3.22	8710	68.75	328	255	1.28627
Zircon_16	-80	20.1	1630	2.22	8390	11.30	31	59	0.52542
Zircon_17	430	2.7	860	1.99	10110	5.18	103	186	0.55376
Zircon_18	2320	3.4	801	1.19	9620	56.20	73	255	0.28627
Zircon_19	920	7.5	997	2.18	8490	4.60	80	175	0.45714
Zircon_20	370	2.5	2350	2.47	8180	63.00	204	305	0.66885
Zircon_21	1130	6.8	1810	2.84	9500	18.93	42	109	0.38532
Zircon_22	420	3.6	1542	3.1	10270	37.05	98	144	0.68056
Zircon_23	250	0.8	874	2.15	10340	3.73	66	135	0.48889
Zircon_24	240	21.8	553	2.95	10420	7.10	28	39	0.71795
Zircon_25	460	1.9	2336	2.12	9320	7.10	156	264	0.59091
Zircon_26	1200	0.9	3920	5.29	10620	15.25	258	500	0.516
Zircon_27	430	2.3	2320	2.57	8460	4.13	124	186	0.66667
Zircon_28	40	13.4	421	0.9	8920	1.50	21	59	0.35593
Zircon_29	170	9.9	730	1.04	9170	1.76	30	68	0.44118
Zircon_30	550	12.1	642	0.78	10800	24.78	39	229	0.17031
Zircon_31	250	7.9	586	2.35	9470	14.58	29	76	0.38158
Zircon_32	240	3.8	738	1.53	8240	1.31	20	47	0.42553
Zircon_33	1260	14.6	3440	1.91	7340	3.38	184	132	1.39394
Zircon_34	90	1.9	934	2.27	9770	4.42	71	177	0.40113
Zircon_35	500	7.5	860	1.55	9060	6.46	61	168	0.3631
Zircon_36	520	3.1	546	1.77	10080	6.45	49	247	0.19838
Zircon_37	760	12	681	0.6	8110	2.71	42	63	0.66667
Zircon_38	240	14.3	667	1.24	8730	2.65	36	97	0.37113
Zircon_39	560	3.8	1870	2.34	9020	5.05	114	202	0.56436
Zircon_40	310	5.4	226.4	1.14	10680	133.25	225	805	0.2795
Zircon_41	320	2	581	1.14	9460	11.38	166	260	0.63846

Zircon_42	660	6.3	1377	3.59	9590	8.18	224	209	1.07177
Zircon_43	340	7.8	767	3.13	9530	36.45	67	182	0.36813
Zircon_44	1150	0.25	1466	1.96	10080	20.38	192	372	0.51613
Zircon_45	520	3.5	1343	1.86	10210	22.45	335	441	0.75964
Zircon_46	460	5.3	1239	4.72	10970	9.73	225	377	0.59682
Zircon_47	930	4.5	846	0.58	11000	17.45	31	224	0.13839
Zircon_48	590	12.7	1447	5.26	9760	252.00	201	478	0.4205
Zircon_49	2730	3.8	5640	9.37	9070	21.73	893	964	0.92635
Zircon_50	290	2.8	729	2.85	9650	22.50	313	563	0.55595
Zircon_51	1210	1.9	2940	6.14	10190	25.68	472	970	0.4866
Zircon_52	90	2.4	1484	1.66	9240	4.99	89	183	0.48634
Zircon_53	340	3.9	791	2.08	10330	9.55	225	370	0.60811
Zircon_54	110	3.3	2307	106.9	11220	77.75	243	828	0.29348
Zircon_55	150	2.7	2195	83.8	9630	75.50	307	753	0.4077
Zircon_56	1050	2.2	918	2.43	7950	44.20	44	189	0.2328
Zircon_57	10	3.6	1359	1.12	9840	3.77	70	135	0.51852
Zircon_58	1050	1.7	2400	4.68	11340	10.73	183	398	0.4598
Zircon_59	40	11	1630	2.78	9340	5.08	124	209	0.5933
Zircon_60	280	2.7	726	4.35	8170	10.25	35	41	0.85366
Zircon_61	400	-0.0001329	1149	2.45	9510	7.43	117	256	0.45703
Zircon_62	1300	1.9	1027	3.08	9930	13.33	227	455	0.4989
Zircon_63	900	10.8	1124	2.28	11470	315.50	200	1519	0.13167
Zircon_64	520	1.2	502	1.5	11000	4.54	54	164	0.32927
Zircon_65	610	3.7	1800	3.01	9500	6.33	186	218	0.85321
Zircon_66	530	1.7	1365	6.02	10490	6.98	106	256	0.41406
Zircon_67	320	2.5	1273	0.48	8440	3.19	69	118	0.58475
Zircon_68	540	1.3	1140	8.15	10250	25.18	60	135	0.44444
Zircon_69	600	13.9	637	4.19	10490	22.70	66	150	0.44
Zircon_70	840	15.5	5670	235.7	8540	125.25	1286	1349	0.9533
Zircon_71	200	2.7	65.9	0.68	11580	13.1	15	138	0.1087
Zircon_72	540	4	900	2.72	10910	62.1	106	289	0.36678
Zircon_73	150	10.1	535	2.64	10190	13.2	35	45	0.77778
Zircon_74	-80	15.4	557	3.17	11450	48.2	72	294	0.2449
Zircon_75	2330	7	986	3.07	10760	6.3	121	228	0.5307
Promedio	736.8	5.900664895	1478.2	8.4544	9653.1	27.498	169	301.3733	0.56027

La geocronología de circones se ha convertido en el método primordial para la determinación de procedencia en sistemas sedimentarios (Grimes, 2015), ya que el circón es el mineral más usado para el fechamiento con el método U-Pb debido a su alta temperatura de cierre para este sistema, y además es uno de los minerales más resistentes a ataques o alteraciones tanto mecánicas como químicas.

La geoquímica del circón proporciona un monitor de la composición de su magma parental y la edad de acoplamiento, así como la información isotópica y elemental de los cristales, ofrece un enfoque para descifrar la historia registrada por los granos detríticos o por xenocristales. Sin embargo, muchas variables diferentes afectan la química de los elementos traza del circón y clasificar su importancia relativa puede ser un desafío, particularmente para los granos cuyo contexto petrológico se pierde. Además de la composición de la masa fundida parental, la partición de los elementos traza entre minerales y la masa fundida está fuertemente influenciada por condiciones de cristalización y varía de acuerdo con la temperatura, presión, fugacidad de oxígeno, competencia por otros minerales y por procesos de desequilibrio de cristalización y formación de la

capa límite (Grimes, 2015). Ya que el circón es un mineral accesorio común que se encuentra en todo el registro geológico de las rocas sedimentarias clásticas, metamórficas e ígneas, muchos circones pueden sufrir múltiples episodios de sedimentación, magmatismo y/o metamorfismo sin que se alteren las relaciones isotópicas que permiten calcular la edad, así mismo se conserva la información química. Numerosas investigaciones se han centrado en relacionar la geoquímica de los elementos traza con la procedencia. Determinar la procedencia de los circones detríticos es de interés tanto en entornos sedimentarios modernos como antiguos, donde las fuentes pueden estar mal definidas, desafortunadamente, la distinción de la composición de la roca madre utilizando la geoquímica del circón es complicada, como lo indica la concentración de los elementos de tierras raras (REE) de circones de la mayoría de los tipos de rocas (Grimes, 2007).

Los diagramas de discriminación en circones basados en la proporción de U/Yb vs Hf y U/Yb vs Nb/Yb muestran las diferencias en la relación de U/Yb en dorsales oceánicas versus rocas ígneas de la corteza, lo que ayuda a determinar su origen. El promedio de la proporción U/Yb para N-MORB (Normal-Mid Ocean Ridge Basalt) es de ~ 0.01 e incrementa para los arcos basálticos primitivos, en donde el promedio es de 0.3 y para la corteza continental inferior y superior los promedios rondan los 0.13 y 1.35, respectivamente (Grimes, 2015). Así mismo, Grimes et al. (2007, 2015) determinan que los circones con relaciones de U/Yb < 0.1 son asociados a fuentes del manto relacionadas a N-MORB, mientras que las relaciones que se encuentran entre 0.1 y 4 están asociados a un arco continental. En la figura 55, puede observarse la relación de U/Yb vs Hf en ppm en la que es posible diferenciar los circones continentales de los que se han originado en la corteza oceánica procedentes del manto (MORB); en el diagrama puede observarse que los circones detríticos en estudio de la muestra LBA-16-7, se encuentran dentro del campo con afinidad a la corteza continental, y en el diagrama de la figura 56, puede observarse que se formaron en un arco magmático.

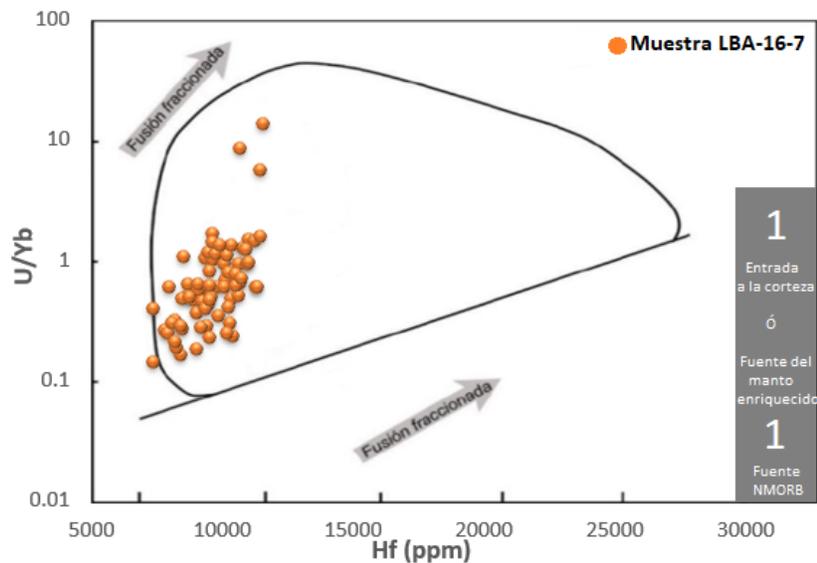


Figura 55. Diagrama de dispersión U/Yb vs Hf (ppm) propuesto por Grimes *et al.* (2007; 2015).

Los valores en la relación de U/Yb aumentan dependiendo el entorno, en el caso de los circones que provienen de gabros oceánicos la relación promedio es de 0.18, para granitoides de 1.07 y para kimberlitas de 2.1.

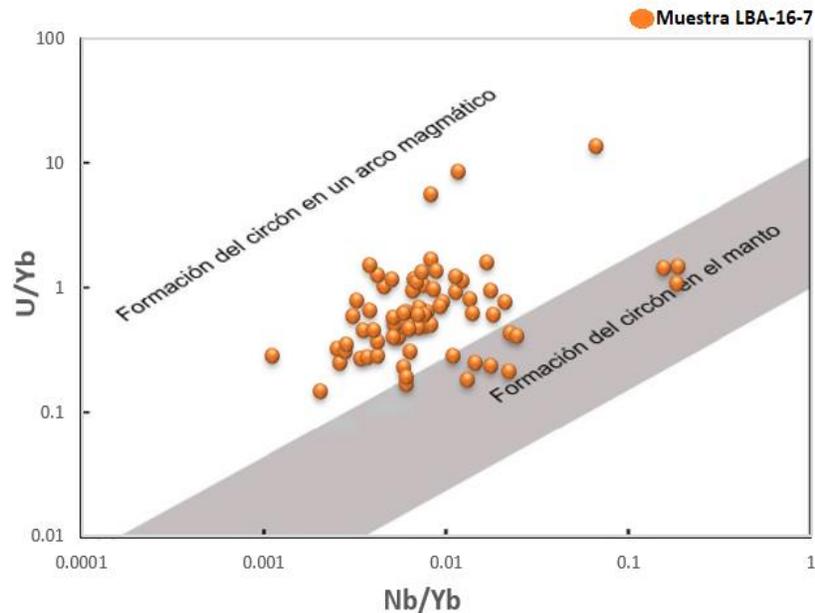


Figura 56. Diagrama de dispersión U/Yb vs Nb/Yb de los circones de la muestra LBA-16-7. (Grimes *et al.* 2015).

Los valores de la relación de Th/U identifican las fases de cristalización de un circon con base a su origen. Rubatto (2002) y Wang (2018) sugieren fuentes ígneas con valores >0.3 , mientras que Hoskin y Schaltegger (2003) indican que por lo general son valores ≥ 0.5 y para los valores bajos en la relación de Th/U que son menores a 0.5 indican un origen metamórfico. En la figura 57, se observa el diagrama de dispersión correspondiente a la relación de Th/U versus la Edad (Ma) para identificar el origen de los circones detríticos de la muestra LBA-16-7. El promedio de la relación Th/U en los circones, es de 0.56, lo que indica que corresponden a un origen ígneo.

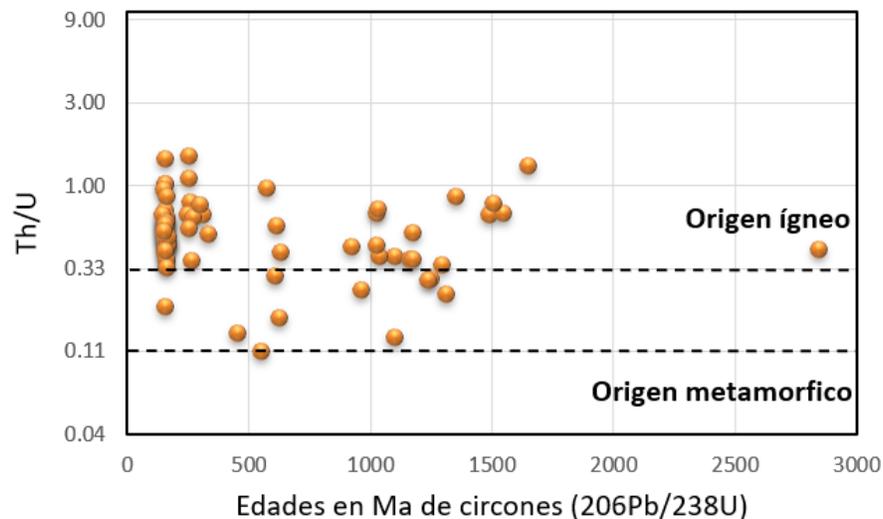


Figura 57. Diagrama de la relación Th/U versus edades (Ma) por el método U-P en circones de La Ballena, Zacatecas. (Wang, 2018).

El valor de la relación Th/U considera que los circones en estudio tienen un origen magmático y tomando en cuenta las edades registradas por el método U-Pb y el área de estudio, es probable que la procedencia de los circones tenga una afinidad con el arco Nazas del Jurásico Inferior, el arco de intrusivos del Permo-Triásico y con el desarrollo de arcos en el margen W de Pangea (Pérez-Casillas, 2018).

Así como los elementos traza, las tierras raras (REE) también ayudan a determinar las fuentes de origen en las que se formaron los circones de la muestra LBA-16-7; para esto, se normalizaron los valores de las concentraciones en ppm respecto a los registrados por Sun y McDonough (1995) para condrita (CI). (Tabla 3).

Tabla 3. Concentración en ppm de REE en circones de la muestra LBA-16-7 normalizados a condrita (CI) de Sun y McDonough (1995). LREE: Sumatoria total de tierras raras ligeras; HREE=Sumatoria total de tierras raras pesadas; TREE=Sumatoria total de elementos de REE; $Eu/Eu^* = Eu / [(SmCl) * (GdCl)]^{1/2}$.

Circoncón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	LREE	HREE	TREE	Eu/Eu*
Zircon_01	0.00422	1.89	0.041	0.19	1.12	0.47	4.73	9.34	15.4	26	39.7	73.9	95.9	3.24623144	264.93675	268.651898	0.20361233
Zircon_02	0.00675	1.42	0.067	0.28	2.37	0.99	11.2	23.5	44.3	79.5	125	230	312	4.13906931	825.515995	830.644407	0.19191027
Zircon_03	0.01055	3.47	0.776	3.17	22.4	7.87	85	152	251	403	575	935	1142	29.8664241	3542.57787	3580.31286	0.18022369
Zircon_04	13.9241	14.7	11.21	10.9	8.24	1.71	14.3	24.5	42.6	75.6	122	251	357	58.9970018	886.693136	947.395289	0.15721036
Zircon_05	0.14557	0.92	0.115	0.25	1.44	0.41	7.19	14.5	26.2	49.6	81.3	165	228	2.87339825	572.015147	575.297071	0.12703372
Zircon_06	0	1.84	0.045	0.15	1.26	1.14	6.13	13.8	25.2	47.4	80.1	183	270	3.29368743	626.154633	630.592192	0.41209608
Zircon_07	0.02152	7.16	0.847	3.61	23	7.44	94	169	280	463	671	1107	1402	34.6134788	4186.29251	4228.34826	0.16017796
Zircon_08	7.00422	8.65	5.927	6.56	6.35	2.04	16.3	29	50.2	89.6	146	305	429	34.4928496	1064.89201	1101.42748	0.20055857
Zircon_09	0.25232	4.08	0.792	2.23	11.7	7.62	40.8	73.4	121	198	298	564	761	19.0437866	2055.78555	2082.44923	0.34890342
Zircon_10	0.27426	7.26	0.219	0.34	1.09	1.01	5.4	11.2	22	44.4	81.8	218	347	9.18158621	729.522275	739.716294	0.41764442
Zircon_11	4.05063	7.44	4.278	4.6	9.05	4.09	23.1	39.9	66.7	111	165	298	393	29.4167157	1096.08226	1129.58423	0.28238753
Zircon_12	0	2.18	0.072	0.37	2.01	1.23	8.99	15.4	26.6	44.5	66.3	122	161	4.63551707	443.927749	449.788844	0.28798074
Zircon_13	0.48101	1.76	0.679	1.07	4.59	1.15	20.2	39	70.7	120	183	325	427	8.58852371	1184.3239	1194.06162	0.11928499
Zircon_14	0	0.96	0.048	0.26	1.72	0.83	7.49	15.6	30.1	57.9	99.4	227	334	2.99433783	771.917999	775.74715	0.23242543
Zircon_15	29.1139	20.4	21.55	8.97	11.5	3.71	19.1	25	40.6	72	116	253	361	91.5152054	887.173801	982.401262	0.25065653
Zircon_16	0.03502	1.79	0.556	1.68	7.77	2.77	25.6	41.6	66.3	102	145	226	265	11.8352301	871.215508	885.821609	0.19635393
Zircon_17	0.00633	1.13	0.047	0.16	1.14	0.35	6.98	14.4	27.9	52.6	86.8	172	243	2.48368974	603.551848	606.385448	0.12389805
Zircon_18	8.64979	10.4	7.866	7.09	5.54	0.69	9.05	14.7	26.4	48.5	78.9	161	229	39.5868812	567.298138	607.572408	0.09709945
Zircon_19	0.05527	1.5	0.085	0.28	1.67	6.15	7.39	15.8	30.4	58.4	101	230	342	3.59404518	785.197147	794.936841	1.75032202
Zircon_20	0	4.6	0.145	0.76	4.25	3.89	17.2	36.4	69.2	136	241	607	886	9.75728837	1992.51626	2006.16342	0.4551502
Zircon_21	0.00549	0.5	0.111	0.52	5.07	1.4	20.5	40.7	70.7	120	176	300	396	6.19856544	1123.87942	1131.47763	0.1373139
Zircon_22	0.01561	2.35	0.168	0.63	3.5	1.07	14.3	29.9	52.6	97.3	151	302	416	6.6586386	1064.05021	1071.77457	0.15079127
Zircon_23	0	1.51	0.051	0.19	1.76	0.53	8.29	16	29.3	52.7	83.5	175	249	3.51056707	614.188055	618.231482	0.13961806
Zircon_24	0.12658	2.3	0.093	0.23	1.43	0.8	5.83	11.6	20.7	34.5	53.4	104	143	4.18160956	373.926624	378.912852	0.27845196
Zircon_25	0.16034	1.35	0.388	1.25	7.37	1.97	30.5	55.2	94.1	155	225	376	490	10.5157009	1425.48337	1437.97065	0.13148168
Zircon_26	0.22785	1.18	0.625	1.55	10.7	1.53	48.4	96.1	161	268	390	625	795	14.31932	2383.8616	2399.70845	0.06695922
Zircon_27	0.00802	1.35	0.328	1.1	7.2	4.17	27.4	50.1	88	150	228	435	600	9.97856321	1577.89217	1592.0448	0.29733348
Zircon_28	0	0.2	0.004	0.1	0.84	0.24	4	8.14	14.9	26	40.7	79.6	109	1.14291626	281.985344	283.368047	0.13045815
Zircon_29	0	0.84	0.008	0.12	1.12	0.88	6.36	12.9	24.1	44.5	75.1	154	222	2.08941175	538.648069	541.622028	0.3311368
Zircon_30	0	0.15	0.014	0.13	1.56	0.16	7.19	12.5	22.4	37.7	57.5	116	174	1.8550783	427.279912	429.296624	0.04826323
Zircon_31	0	1.16	0.12	0.45	2.85	0.51	10.5	17.3	26.3	39.6	51.6	80.2	103	4.5794106	328.15206	333.239464	0.09305231
Zircon_32	0	0.68	0.033	0.11	1.09	0.74	5.95	12.4	23.9	44.5	73.9	157	222	1.91659551	540.125925	542.783195	0.29011379
Zircon_33	1.89873	4.08	2.414	3.74	16.4	15.7	52.8	87.3	138	219	321	578	781	28.5515439	2177.47717	2221.74807	0.53381132
Zircon_34	0.0135	1.27	0.032	0.19	1.58	0.36	7.82	17.3	30.8	58.6	93.9	186	262	3.08645079	656.150617	659.597636	0.10251627
Zircon_35	0	1.83	0.028	0.17	1.37	1.15	6.96	13.1	25.4	48.3	83.8	187	265	3.39465209	629.828596	634.377777	0.37367105
Zircon_36	0.79747	1.27	0.496	0.47	0.71	0.19	2.71	6.01	13.4	29.8	63.5	167	262	3.74113129	544.349098	548.283835	0.13966464

Zircon_37	0	0.45	0.069	0.32	1.99	0.94	7.69	14.3	24.6	43.6	68.8	132	183	2.82680286	474.189827	477.958015	0.24088263
Zircon_38	0	0.28	0.031	0.18	1.34	0.28	6.33	13	23.5	42.1	65.3	124	169	1.826918	443.626269	445.730274	0.09520412
Zircon_39	0.00422	1.4	0.101	0.5	3.78	1.39	19.1	38.5	68.3	119	184	347	463	5.79551495	1238.50527	1245.68622	0.16298881
Zircon_40	0.0019	2.02	0.014	0.09	0.46	0.3	2.06	3.8	7.03	12.1	21.5	60.3	91.4	2.5906659	198.245701	201.134768	0.30669867
Zircon_41	0	1.76	0.051	0.31	1.37	1.35	5.73	9.97	18.3	33.3	56.5	140	221	3.48992339	485.337841	490.177675	0.48157302
Zircon_42	0	7.21	0.088	0.44	3.11	3.07	13.8	26.1	47.3	82.4	129	268	363	10.8556805	930.139431	944.067936	0.46835838
Zircon_43	0	1.33	0.033	0.16	1.39	0.2	7.38	14.9	26.8	47.9	73.2	143	188	2.91511826	501.232758	504.350363	0.06316978
Zircon_44	0.80169	2.48	0.593	0.83	1.76	0.96	8.04	18.6	40	81.1	152	397	632	6.46899202	1328.66097	1336.08911	0.25471969
Zircon_45	0	1.91	0.028	0.14	1.23	0.92	8.18	17.6	36.5	75.6	138	355	557	3.31081311	1187.86461	1192.09904	0.29128819
Zircon_46	0.02194	3.18	0.069	0.21	1.86	0.54	10.2	22.2	41	74.4	122	258	357	5.34253726	884.631213	890.513715	0.12410588
Zircon_47	0	0.14	0.013	0.08	1.22	0.04	8.74	20.5	34.3	50	62.2	93.9	114	1.45879177	383.370196	384.86984	0.012429289
Zircon_48	0.35865	1.81	0.313	0.48	1.86	0.48	10.6	23.2	46.2	86.4	139	268	352	4.82818181	925.556708	930.860911	0.10705033
Zircon_49	12.3207	17.4	11.34	14.3	27.9	4.1	94.3	161	265	432	624	964	1195	83.2684639	3736.01063	3723.38211	0.07997492
Zircon_50	0.03122	4.23	0.032	0.15	1.08	1.06	4.69	10.3	19.2	39.2	73.9	214	344	5.51636296	705.861914	712.436892	0.46996101
Zircon_51	0.05527	2.33	0.108	0.53	4.47	0.71	24.3	53.2	97.6	180	288	555	748	7.48720277	1946.29364	1954.48777	0.06782795
Zircon_52	0.00506	0.66	0.067	0.35	3.38	0.45	15.5	31	53.7	95.1	144	257	341	4.46486608	936.763453	941.679474	0.06239106
Zircon_53	0	2.08	0.024	0.13	1.16	0.56	6.1	12.7	24.1	45.2	76.9	176	259	3.38978122	600.525776	604.480389	0.21283726
Zircon_54	0.03671	5.61	0.125	0.57	4.94	0.32	26.8	53.6	96.8	155	224	356	429	11.2793832	1339.98978	1351.59066	0.02865926
Zircon_55	0	5.86	0.109	0.66	6.27	0.2	29.1	58.6	97.6	153	211	332	392	12.8941935	1273.94707	1287.03843	0.01458425
Zircon_56	2.19409	2.9	1.735	1.77	2.47	0.53	7.54	15.8	29	55.3	93.1	199	291	11.0781605	690.741747	702.354543	0.12383098
Zircon_57	0	0.97	0.022	0.28	2.37	0.78	13.3	26.7	48.1	86.3	133	245	336	3.64115204	888.590474	893.01493	0.13938341
Zircon_58	0	0.58	0.138	0.49	5.53	0.72	26.8	53.2	93.9	162	238	417	525	6.74350065	1516.42461	1523.88391	0.05883202
Zircon_59	0.12658	1.53	0.082	0.43	2.94	1.37	14.1	29.3	54.5	98.9	163	336	470	5.10999413	1165.41251	1171.89018	0.21267482
Zircon_60	0	0.86	0.04	0.34	2.03	0.71	8.59	16.8	27.5	46.2	69.2	123	169	3.26686629	459.480871	463.452908	0.1689588
Zircon_61	0.00506	1.76	0.048	0.23	1.58	0.83	8.14	17.1	33.7	63.9	113	260	382	3.62184576	876.753715	881.210374	0.23269198
Zircon_62	2.74262	4.89	2.047	2.14	2.57	0.57	8.29	18	32.7	60.3	97.9	215	304	14.3959816	735.739203	750.703569	0.12318709
Zircon_63	0.35865	3.12	0.446	1.39	7.43	6.8	22.2	33.1	44.8	67	92.6	170	241	12.7313903	671.342564	690.876796	0.52970954
Zircon_64	0	0.66	0	0.06	0.46	0.15	3.44	7.29	15.8	29.3	50.3	109	159	1.17876831	374.34761	375.673802	0.11722692
Zircon_65	0.03924	1.61	0.23	0.89	5.43	1.72	21.7	40.2	66.7	113	168	298	408	8.18587671	1114.46733	1124.37612	0.15875269
Zircon_66	0.01097	1.26	0.031	0.24	2.14	0.24	11.6	25	47.2	86.3	138	266	355	3.68288674	929.413161	933.335834	0.04816519
Zircon_67	0.00245	0.58	0.158	0.61	3.59	2.77	13.7	24.7	43.4	73.8	120	265	377	4.942689	917.970401	925.683961	0.39495263
Zircon_68	0	2.01	0.051	0.26	2.22	0.48	10.3	22.3	38.7	70.3	110	208	269	4.54543265	728.233855	733.262414	0.10120568
Zircon_69	0.00506	2.78	0.063	0.25	1.72	0.5	7.01	13.4	23.3	40.3	61.5	123	168	4.81411178	436.840929	442.157711	0.14497302
Zircon_70	0.04388	15.8	0.265	1.16	13.6	0.6	80.3	163	281	438	598	789	877	30.8966081	3227.38478	3258.88174	0.01813433
Zircon_71	0	0.49	0	0.03	0.12	0.33	0.79	1.78	2.45	3.52	4.52	6.35	7.15	0.65026648	26.5547938	27.5301047	1.04933465
Zircon_72	0.43038	1.47	0.754	0.77	2.59	0.27	9.85	18.8	32.9	56.6	84	150	193	6.01333825	544.888974	551.172295	0.05340709
Zircon_73	0	2.23	0.02	0.09	0.95	0.38	4.61	9.83	18	32.9	52.6	114	161	3.29565374	393.470425	397.142633	0.1796197
Zircon_74	0.0173	2.13	0.047	0.18	0.93	0.78	4.91	10	19.3	33.2	53.9	117	162	3.3048944	400.27646	404.359329	0.36361039
Zircon_75	7.1308	8.76	5.496	5.34	4.05	0.89	9.3	18	31.6	58.6	94.8	206	291	30.7799096	708.576116	740.244126	0.14466302

En la relación de las concentraciones de condrita (CI) con sus REE ligeras y pesadas de la figura 58, se observa que existe un enriquecimiento en tierras raras pesadas (HREE), que es un indicador de circones de origen ígneo, según Hoskin e Ireland (2000). Además, se aprecia una marcada anomalía negativa de Eu y una positiva para Ce que también son características distintivas de circones ígneos sin alteraciones (Hoskin y Shallegger, 2003).

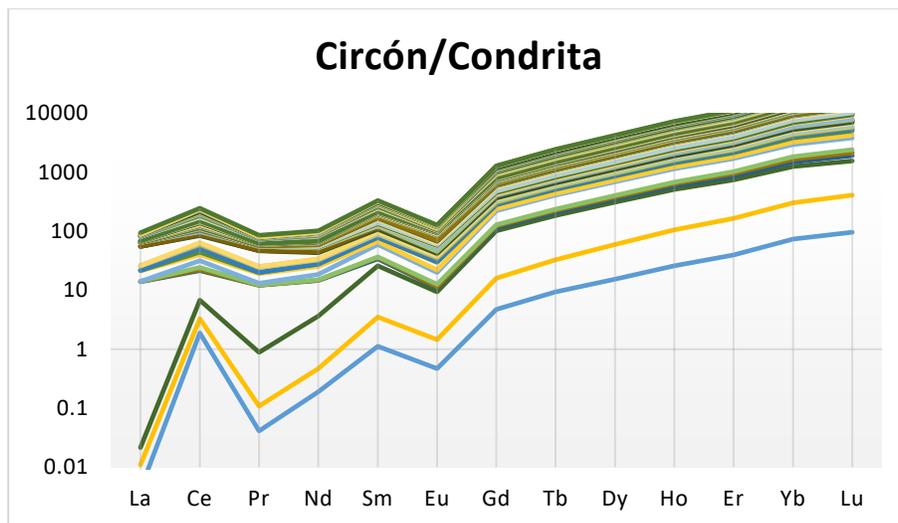


Figura 58. Diagrama de tierras raras de circones de la muestra LBA-16-7 con valores normalizados a condrita (CI) de Sun y McDonough (1995).

La anomalía negativa de Eu ($Eu/Eu^* = <1$) es indicativa de fuentes ígneas silíceas y una anomalía de Eu positiva ($Eu/Eu^* = 1$) indica fuentes básicas (Cullers *et al.*, 1997), para los circones de la muestra LBA-16-7, la anomalía de Eu es negativa, es decir valores < 1 , con algunas excepciones mínimas, por lo que se considera que la fuente ígnea tiene una afinidad silíceas.

5.- Geocronología de Circones de la Formación La Joya.

Los análisis para este estudio consistieron en la medición de las relaciones de U-Pb mediante un sistema de ablación láser acoplado a espectrometría de masas con plasma inductivo (LA-ICPMS). Estos análisis reflejan la concentración de isótopos de U (Th)-Pb, tierras raras (REE) y algunos elementos traza, la cual está comparada con los valores aceptados de los circones de referencia Témora y Plešovice. En la tabla 4 pueden observarse los resultados obtenidos de las relaciones isotópicas y las edades de depósito de los circones de la muestra LBA-16-7.

Tabla 4. Resultados de la geocronología U-Pb de circones detríticos de la muestra LBA-16-7 del área La Ballena, Zacatecas.

Muestra: LBA-16-7				Relaciones corregidas								Edades corregidas (Ma)									
Circoncón	U (ppm) ¹	Th (ppm) ¹	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s abs	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±2s abs	Rho	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2s	Best age (Ma)	±2s	Disc %
Zircon_01	50	29	0.58	0.0597	0.0046	0.8290	0.0580	0.1010	0.0033	0.0306	0.0017	-0.09	620.0	19.0	616.0	29.0	590.0	170.0	620.0	19.0	-0.65
Zircon_02	278	95	0.34	0.0840	0.0034	2.6000	0.1000	0.2235	0.0046	0.0664	0.0018	0.52	1300.0	24.0	1300.0	29.0	1289.0	78.0	1300.0	24.0	0.00
Zircon_03	389	392	1.01	0.0507	0.0030	0.1804	0.0096	0.0252	0.0006	0.0077	0.0003	0.03	160.4	4.0	168.2	8.2	210.0	130.0	160.4	4.0	4.64
Zircon_04	112	52	0.46	0.0486	0.0048	0.1760	0.0170	0.0261	0.0009	0.0082	0.0005	0.20	165.9	5.5	166.0	15.0	160.0	190.0	165.9	5.5	0.06
Zircon_05	156	110	0.71	0.0559	0.0065	0.2020	0.0190	0.0257	0.0010	0.0087	0.0007	-0.02	163.4	6.4	186.0	16.0	440.0	210.0	163.4	6.4	12.15
Zircon_06	336	216	0.64	0.0509	0.0035	0.1820	0.0120	0.0259	0.0006	0.0083	0.0003	0.08	164.9	3.9	169.0	11.0	240.0	150.0	164.9	3.9	2.43
Zircon_07	698	695	1.00	0.0494	0.0026	0.1759	0.0085	0.0256	0.0005	0.0078	0.0002	0.01	162.8	3.4	164.4	7.4	160.0	120.0	162.8	3.4	0.97
Zircon_08	316	171	0.54	0.0525	0.0038	0.1840	0.0120	0.0257	0.0006	0.0079	0.0004	-0.02	163.4	3.9	171.0	11.0	300.0	160.0	163.4	3.9	4.44
Zircon_09	220	321	1.46	0.0520	0.0036	0.2930	0.0200	0.0406	0.0009	0.0120	0.0004	0.05	256.3	5.7	260.0	15.0	250.0	150.0	256.3	5.7	1.42
Zircon_10	321	254	0.79	0.0560	0.0032	0.3210	0.0190	0.0416	0.0010	0.0129	0.0004	0.55	262.7	5.9	284.0	15.0	440.0	120.0	262.7	5.9	7.50
Zircon_11	495	328	0.66	0.0533	0.0024	0.3700	0.0160	0.0506	0.0011	0.0157	0.0004	0.49	318.2	6.8	320.0	12.0	330.0	100.0	318.2	6.8	0.56
Zircon_12	35	24	0.69	0.0752	0.0057	1.7700	0.1200	0.1729	0.0046	0.0534	0.0028	0.07	1028.0	25.0	1027.0	45.0	1070.0	150.0	1028.0	25.0	-0.10
Zircon_13	260	162	0.62	0.0503	0.0036	0.1820	0.0120	0.0261	0.0007	0.0079	0.0004	0.08	165.8	4.3	171.0	11.0	220.0	150.0	165.8	4.3	3.04
Zircon_14	195	120	0.62	0.0514	0.0052	0.1780	0.0170	0.0251	0.0007	0.0080	0.0005	-0.01	160.0	4.7	165.0	15.0	190.0	210.0	160.0	4.7	3.03
Zircon_15	255	328	1.29	0.1011	0.0042	4.1400	0.2000	0.2921	0.0093	0.0842	0.0051	0.66	1652.0	47.0	1667.0	44.0	1641.0	76.0	1641.0	76.0	0.90
Zircon_16	59	31	0.53	0.0801	0.0045	2.1900	0.1200	0.2006	0.0048	0.0579	0.0032	-0.07	1178.0	26.0	1176.0	39.0	1180.0	120.0	1178.0	26.0	-0.17
Zircon_17	186	103	0.55	0.0513	0.0048	0.1820	0.0160	0.0257	0.0008	0.0085	0.0004	0.04	163.5	4.8	168.0	14.0	240.0	200.0	163.5	4.8	2.68
Zircon_18	255	73	0.29	0.0816	0.0035	2.4240	0.0980	0.2150	0.0044	0.0633	0.0017	0.14	1256.0	23.0	1249.0	29.0	1228.0	86.0	1256.0	23.0	-0.56
Zircon_19	175	80	0.46	0.0553	0.0050	0.2030	0.0180	0.0271	0.0007	0.0088	0.0005	0.08	172.6	4.6	190.0	16.0	400.0	200.0	172.6	4.6	9.16
Zircon_20	305	204	0.67	0.0937	0.0039	3.4300	0.1300	0.2608	0.0052	0.0784	0.0020	0.31	1494.0	27.0	1511.0	30.0	1496.0	81.0	1496.0	81.0	1.13
Zircon_21	109	42	0.39	0.0764	0.0036	1.9930	0.0900	0.1873	0.0044	0.0577	0.0026	0.37	1107.0	23.0	1111.0	30.0	1105.0	97.0	1107.0	23.0	0.36
Zircon_22	144	98	0.68	0.0953	0.0057	3.6100	0.2300	0.2725	0.0063	0.0803	0.0072	0.37	1553.0	32.0	1549.0	46.0	1540.0	99.0	1544.0	99.0	-0.26
Zircon_23	135	66	0.49	0.0524	0.0055	0.1810	0.0190	0.0254	0.0007	0.0078	0.0006	-0.01	161.6	4.5	171.0	17.0	250.0	210.0	161.6	4.5	5.50
Zircon_24	39	28	0.72	0.0749	0.0049	1.8100	0.1200	0.1745	0.0047	0.0540	0.0022	0.13	1037.0	25.0	1043.0	41.0	1070.0	120.0	1037.0	25.0	0.58
Zircon_25	264	156	0.59	0.0497	0.0037	0.1760	0.0120	0.0255	0.0007	0.0079	0.0004	-0.08	162.1	4.1	166.0	10.0	180.0	150.0	162.1	4.1	2.35
Zircon_26	500	258	0.52	0.0534	0.0037	0.1920	0.0140	0.0259	0.0006	0.0079	0.0004	0.33	164.6	3.7	178.0	12.0	340.0	140.0	164.6	3.7	7.53
Zircon_27	186	124	0.67	0.0482	0.0039	0.1580	0.0120	0.0237	0.0007	0.0074	0.0004	-0.05	151.2	4.6	152.0	10.0	120.0	170.0	151.2	4.6	0.53
Zircon_28	59	21	0.36	0.0497	0.0072	0.1770	0.0260	0.0265	0.0011	0.0087	0.0010	0.05	168.4	7.1	167.0	23.0	90.0	290.0	168.4	7.1	-0.84
Zircon_29	68	30	0.44	0.0446	0.0054	0.1800	0.0210	0.0272	0.0010	0.0093	0.0009	0.20	172.8	6.1	166.0	18.0	-100.0	230.0	172.8	6.1	-4.10
Zircon_30	229	39	0.17	0.0603	0.0029	0.8640	0.0380	0.1033	0.0021	0.0321	0.0014	-0.06	633.0	12.0	631.0	21.0	600.0	100.0	633.0	12.0	-0.32
Zircon_31	76	29	0.38	0.0725	0.0036	1.7660	0.0850	0.1756	0.0040	0.0531	0.0022	0.11	1043.0	22.0	1034.0	31.0	1010.0	100.0	1043.0	22.0	-0.87
Zircon_32	47	20	0.43	0.0563	0.0069	0.1840	0.0200	0.0250	0.0011	0.0079	0.0011	-0.22	159.1	6.7	176.0	16.0	410.0	250.0	159.1	6.7	9.60
Zircon_33	132	184	1.39	0.0558	0.0057	0.1980	0.0190	0.0255	0.0009	0.0082	0.0003	-0.10	162.2	5.7	185.0	15.0	480.0	210.0	162.2	5.7	12.32
Zircon_34	177	71	0.40	0.0507	0.0047	0.1750	0.0160	0.0250	0.0008	0.0077	0.0006	0.09	159.0	5.2	162.0	14.0	200.0	190.0	159.0	5.2	1.85
Zircon_35	168	61	0.36	0.0555	0.0041	0.3240	0.0220	0.0431	0.0010	0.0136	0.0006	0.05	272.1	6.1	284.0	17.0	380.0	150.0	272.1	6.1	4.19
Zircon_36	247	49	0.20	0.0515	0.0032	0.1800	0.0110	0.0257	0.0007	0.0087	0.0007	-0.08	163.6	4.2	167.9	8.9	280.0	130.0	163.6	4.2	2.56
Zircon_37	63	42	0.67	0.0526	0.0048	0.2910	0.0250	0.0402	0.0016	0.0136	0.0010	-0.02	254.2	9.6	258.0	19.0	300.0	190.0	254.2	9.6	1.47
Zircon_38	97	36	0.37	0.0553	0.0054	0.1930	0.0190	0.0259	0.0009	0.0078	0.0007	0.08	164.7	5.5	178.0	15.0	340.0	200.0	164.7	5.5	7.47
Zircon_39	202	114	0.56	0.0480	0.0037	0.1700	0.0120	0.0256	0.0008	0.0080	0.0006	-0.02	162.6	5.1	159.0	10.0	130.0	160.0	162.6	5.1	-2.26
Zircon_40	805	225	0.28	0.0804	0.0032	2.4050	0.0910	0.2129	0.0043	0.0658	0.0015	0.28	1244.0	23.0	1244.0	26.0	1203.0	78.0	1244.0	23.0	0.00
Zircon_41	260	166	0.64	0.0526	0.0028	0.3160	0.0160	0.0438	0.0010	0.0132	0.0004	0.15	276.0	6.4	278.0	12.0	290.0	120.0	276.0	6.4	0.72
Zircon_42	209	224	1.07	0.0503	0.0032	0.2810	0.0170	0.0406	0.0010	0.0123	0.0005	-0.02	256.6	6.1	251.0	13.0	190.0	140.0	256.6	6.1	-2.23
Zircon_43	182	67	0.37	0.0801	0.0039	2.2000	0.0980	0.1985	0.0040	0.0563	0.0019	0.19	1167.0	23.0	1182.0	32.0	1193.0	96.0	1167.0	23.0	1.27
Zircon_44	372	192	0.52	0.0527	0.0027	0.3910	0.0180	0.0536	0.0015	0.0163	0.0006	0.16	337.7	9.4	334.0	13.0	300.0	110.0	337.7	9.4	-1.11
Zircon_45	441	335	0.76	0.0525	0.0026	0.3540	0.0170	0.0485	0.0011	0.0144	0.0004	0.18	305.1	6.8	307.0	13.0	290.0	110.0	305.1	6.8	0.62
Zircon_46	377	225	0.60	0.0496	0.0032	0.1730	0.0120	0.0250	0.0006	0.0079	0.0002	0.04	159.1	3.8	162.8	9.9	160.0	140.0	159.1	3.8	2.27
Zircon_47	224	31	0.14	0.0567	0.0030	0.5720	0.0250	0.0734	0.0017	0.0275	0.0019	0.17	456.0	10.0	459.0	16.0	460.0	110.0	456.0	10.0	0.65
Zircon_48	478	201	0.42	0.2091	0.0082	16.0800	0.5800	0.5560	0.0110	0.1501	0.0030	0.65	2850.0	46.0	2881.0	35.0	2899.0	61.0	2899.0	61.0	1.08
Zircon_49	964	893	0.93	0.0501	0.0032	0.1700	0.0110	0.0247	0.0005	0.0079	0.0003	-0.01	157.4	3.4	159.4	9.3	180.0	140.0	157.4	3.4	1.25
Zircon_50	563	313	0.56	0.0514	0.0025	0.2920	0.0130	0.0410	0.0010	0.0124	0.0005	0.23	259.1	5.9	260.0	10.0	260.0	100.0	259.1	5.9	0.35
Zircon_51	970	472	0.49	0.0490	0.0023	0.1754	0.0074	0.0257	0.0006	0.0083	0.0003	0.02	163.5	3.5	164.6	6.6	150.0	110.0	163.5	3.5	0.67

Zircon_52	183	89	0.49	0.0492	0.0041	0.1730	0.0140	0.0253	0.0008	0.0078	0.0005	0.02	161.0	5.1	165.0	12.0	150.0	180.0	161.0	5.1	2.42
Zircon_53	370	225	0.61	0.0514	0.0029	0.1802	0.0097	0.0257	0.0007	0.0079	0.0003	0.16	163.8	4.4	168.0	8.3	240.0	120.0	163.8	4.4	2.50
Zircon_54	828	243	0.29	0.0610	0.0025	0.8380	0.0320	0.0996	0.0022	0.0296	0.0008	0.50	612.0	13.0	617.0	18.0	652.0	86.0	612.0	13.0	0.81
Zircon_55	753	307	0.41	0.0610	0.0026	0.8730	0.0350	0.1036	0.0021	0.0318	0.0007	-0.10	635.0	13.0	637.0	19.0	635.0	89.0	635.0	13.0	0.31
Zircon_56	189	44	0.23	0.0837	0.0036	2.6100	0.1000	0.2269	0.0047	0.0715	0.0024	0.13	1318.0	25.0	1305.0	29.0	1290.0	85.0	1318.0	25.0	-1.00
Zircon_57	135	70	0.52	0.0510	0.0042	0.1770	0.0140	0.0248	0.0008	0.0081	0.0006	-0.06	158.1	5.3	167.0	12.0	280.0	170.0	158.1	5.3	5.33
Zircon_58	398	183	0.46	0.0509	0.0033	0.1920	0.0120	0.0272	0.0006	0.0083	0.0004	0.26	173.3	3.9	180.0	10.0	210.0	140.0	173.3	3.9	3.72
Zircon_59	209	124	0.59	0.0547	0.0050	0.1980	0.0180	0.0265	0.0009	0.0088	0.0006	0.22	168.4	5.7	183.0	15.0	440.0	170.0	168.4	5.7	7.98
Zircon_60	41	35	0.85	0.0906	0.0051	2.9000	0.1400	0.2349	0.0066	0.0691	0.0026	0.13	1359.0	34.0	1389.0	35.0	1430.0	110.0	1359.0	34.0	2.16
Zircon_61	256	117	0.46	0.0502	0.0030	0.1890	0.0130	0.0272	0.0011	0.0093	0.0007	0.11	172.8	6.7	175.0	11.0	210.0	130.0	172.8	6.7	1.26
Zircon_62	455	227	0.50	0.0516	0.0030	0.1910	0.0099	0.0273	0.0006	0.0085	0.0003	-0.15	173.4	4.0	177.2	8.4	240.0	120.0	173.4	4.0	2.14
Zircon_63	1519	200	0.13	0.0798	0.0031	2.0440	0.0740	0.1868	0.0037	0.0585	0.0019	0.47	1104.0	20.0	1130.0	25.0	1190.0	78.0	1104.0	20.0	2.30
Zircon_64	164	54	0.33	0.0515	0.0034	0.1810	0.0110	0.0265	0.0008	0.0085	0.0006	0.00	168.5	5.2	168.2	9.7	230.0	140.0	168.5	5.2	-0.18
Zircon_65	218	186	0.85	0.0469	0.0038	0.1730	0.0140	0.0261	0.0007	0.0088	0.0005	-0.03	166.3	4.6	161.0	13.0	30.0	160.0	166.3	4.6	-3.29
Zircon_66	256	106	0.41	0.0511	0.0036	0.1750	0.0130	0.0252	0.0007	0.0082	0.0004	0.07	160.3	4.2	163.0	11.0	210.0	150.0	160.3	4.2	1.66
Zircon_67	118	69	0.58	0.0506	0.0047	0.1780	0.0160	0.0252	0.0008	0.0077	0.0005	0.10	160.2	5.2	167.0	14.0	250.0	190.0	160.2	5.2	4.07
Zircon_68	135	60	0.44	0.0724	0.0031	1.6940	0.0770	0.1733	0.0041	0.0513	0.0016	-0.09	1030.0	22.0	1011.0	29.0	980.0	100.0	1030.0	22.0	-1.88
Zircon_69	150	66	0.44	0.0680	0.0034	1.4620	0.0680	0.1544	0.0036	0.0478	0.0016	0.04	925.0	20.0	917.0	29.0	853.0	99.0	925.0	20.0	-0.87
Zircon_70	1349	1286	0.95	0.0586	0.0023	0.7580	0.0280	0.0936	0.0018	0.0287	0.0006	0.14	577.0	11.0	573.0	16.0	553.0	91.0	577.0	11.0	-0.70
Zircon_71	138	15	0.11	0.0566	0.0035	0.7080	0.0430	0.0895	0.0021	0.0258	0.0021	-0.01	553.0	13.0	541.0	25.0	490.0	130.0	553.0	13.0	-2.22
Zircon_72	289	106	0.37	0.0806	0.0033	2.2030	0.0870	0.2005	0.0042	0.0590	0.0018	0.35	1178.0	22.0	1181.0	27.0	1208.0	82.0	1178.0	22.0	0.25
Zircon_73	45	35	0.78	0.0937	0.0045	3.4200	0.1600	0.2643	0.0063	0.0759	0.0027	0.36	1512.0	32.0	1510.0	39.0	1500.0	88.0	1500.0	88.0	-0.13
Zircon_74	294	72	0.24	0.0735	0.0032	1.6230	0.0660	0.1615	0.0033	0.0473	0.0016	0.27	965.0	18.0	979.0	26.0	1021.0	91.0	965.0	18.0	1.43
Zircon_75	228	121	0.53	0.0545	0.0034	0.1810	0.0120	0.0244	0.0007	0.0082	0.0003	0.08	155.2	4.3	168.0	10.0	380.0	150.0	155.2	4.3	7.62

Las edades de los circones no son las definitivas para una edad absoluta, pero se pretende encontrar la edad máxima del depósito que corresponden con las edades menores de circones contenidos dentro de una muestra. Para el caso de los circones de la muestra LBA-16-7 se puede estimar una edad máxima del depósito de 151.2 Ma basada en la edad del circón más joven, mientras que otras edades de circones jóvenes están entre los 155.2 hasta 160.0 Ma. Cualquiera resultado en este rango, que se considere para la edad de depósito de los sedimentos ubicaría a las rocas de la Formación La Joya en un tiempo geológico más joven del que se tiene registrado, en el Jurásico Superior (Kimmeridgiano -Tithoniano), ya que la edad más joven y actualizada reportada para éstas rocas en el área de La Ballena, Zacatecas es de Wengler (2019). El mismo autor menciona que aunado a la edad máxima del depósito y la ausencia de fragmentos volcánicos en algunas muestras de sus análisis pueden indicar que la Formación La Joya puede ser mucho más joven de lo que se pensaba anteriormente; así mismo, Barboza *et al.* (2020) registra un promedio de edad de 168 ± 2.1 Ma por el método 206Pb/238U para la probable cristalización de los piroclastos en las rocas de La Ballena, Sierra de Salinas. En la figura 59 se muestra el histograma y curva de probabilidad relativa en donde se observa la distribución de edades para la muestra LBA-16-7.

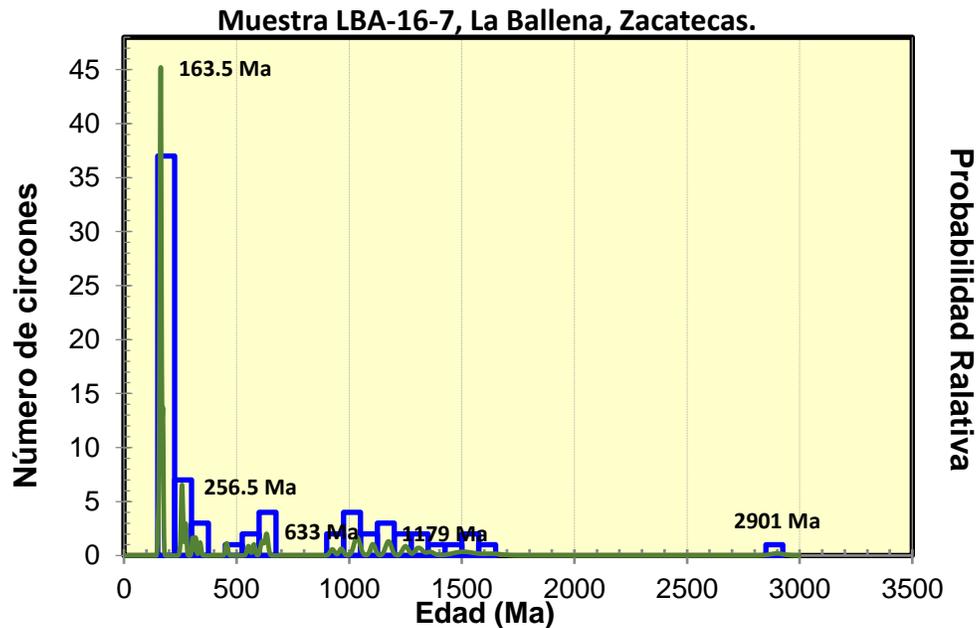


Figura 59. Histograma y curva de probabilidad relativa de los circones de la muestra LBA-16-7.

En la figura 59 se observa una distribución de edades muy amplia de los 75 circones analizados, sin embargo, hay un rango de edades preferente para los circones del área de estudio, que va desde los 151.2 a los 173.4 Ma que

corresponde al Jurásico Medio-Superior, los cuales son derivados probablemente del arco magmático conocido como Arco Nazas, el cual tuvo su desarrollo desde inicios del Jurásico Inferior hasta finales del Jurásico Medio aproximadamente. Las rocas ígneas cercanas a la zona de estudio se encuentran expuestas alrededor de la unidad siliciclástica de estudio en Cerro Grande, por lo que es considerada el área fuente más probable para los circones de la muestra LBA-16-7.

La distribución de las edades en los análisis muestra cinco poblaciones principales, la primera está constituida por 37 circones en los que su rango de edad va de 151.2 a 173.3 Ma que corresponden al Jurásico Medio-Superior. La segunda población más abundante es de 13 circones en un rango de 925 a 1256 Ma que corresponden al Grenvilleano, posiblemente derivados del Bloque Oaxaquia; la tercera población se conforma de 7 circones con edades de del Permo-Triásico en un rango de 254.2 a 276.0 Ma, los cuales pueden tener su origen en el arco Permo-Triásico del noreste de México, resultado de la subducción de la placa Paleopacífica bajo la placa Norteamericana (Pérez-Casillas, 2018) y según Ortega-Flores *et al.* (2014) los circones detríticos que registran aproximadamente este rango de edades derivan de un arco magmático continental que se localizó en el margen oeste de Pangea y la actividad de este arco ocurrió entre los 283-235 Ma (Dickinson y Stern, 2010). La cuarta población tiene un rango de edad de 546.0 a 635.0 con 7 circones dentro de los análisis, procedentes probablemente del Bloque de Yucatán/Orogenia Maya del Panafricano, y la quinta población más relevante también contiene 7 circones y su rango de edad es de 1300 a 1642 Ma, que ubica a los circones en el Meso-Neoproterozoico, probablemente procedentes también del Bloque Oaxaquia (Wengler, 2014). Tabla 5.

Tabla 5. Probable procedencia de circones detríticos de la muestra LBA-16-7 de unidad siliciclástica de La Ballena, Zacatecas. Modificado de Pérez-Casillas (2018).

Edad (Ma)	Procedencia	Circones	Porcentaje (%)
~150 - ~200	Arco Nazas	37	49.33
~ 235 - ~300	Arcos Permo-Triásicos	7	9.33
~305 - ~445	Arcos Perigondwanicos/ Esquisto Granjeno	3	4.00
~ 450 - ~700	Orogenia Panafricana/ Bloque de Yucatán	7	9.33
~900 - ~1300	Meso-Neoproterozoico/ Cinturón Grenvilleano	13	17.33
~1300 - ~1650	Mesoproterozoico/ Microcontinente Oaxaquia	7	9.33
2899	Neo-Mesoarqueano	1	1.33
nCN=		75	100

En la figura 60 se muestra el diagrama de concordia tipo Wetherill que representa el sistema de comportamiento no lineal de la relación de los isótopos $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Se observa que las edades están sobre la curva de concordia con discordancias menores sobre ella, por lo que demuestra que los circones son concordantes entre sí, descartando el circón que se encuentra por encima de los 2500 Ma ya que al ser un solo dato de ese rango, no representa un resultado confiable, en cambio, las demás concentraciones de las edades

son comparables entre la población a la que pertenecen como se mostró en el diagrama anterior y que dio pie a la interpretación de las posibles procedencias de los circones en estudio. Al ser las edades de ambas relaciones iguales, se dice que son concordantes y entonces corresponde a la edad real de cristalización del mineral, es decir, de los circones en estudio, cuando las relaciones no coinciden, se dice que son edades discordantes y son causadas por pérdida y/o ganancia de Pb o U en el sistema (Wetherill, 1956).

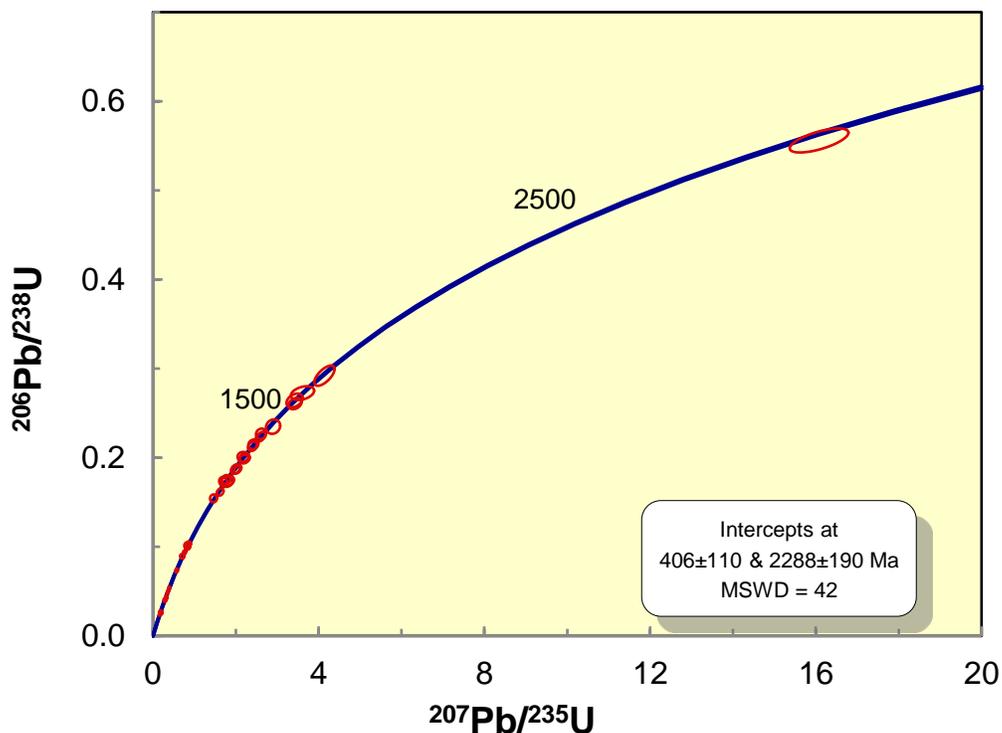


Figura 60. Diagrama de concordia tipo Wetherill para los circones de la muestra LBA-16-7.

DISCUSIÓN

De acuerdo con el detalle geológico que se muestra en el mapa del capítulo 2 (Figura 2.1), se actualizó el mapa del área de estudio con base a la carta geológica del SGM, Loreto F14A71, en la que no se tienen registradas algunas unidades que comprenden la localidad de La Ballena, Zacatecas, específicamente en la zona de Cerro Grande, Sierra de Salinas; dicha carta sólo registra esquistos y granitos. Sin embargo, Barajas-Nigoche (2008), trabajó con el análisis de deformación en las localidades de la secuencia siliciclástica marina del Triásico Superior de la porción occidental del estado de San Luis Potosí, y hace una actualización del mapa geológico que comprende la zona de estudio y contempla unidades Triásicas que corresponden a la Formación Zacatecas, Jurásicas de la Formación Nazas, y el intrusivo de granito que ya estaba registrado por el SGM, esto específicamente en Cerro Grande, pero su trabajo incluye también los alrededores de La Ballena, donde también reporta otras unidades Jurásicas y Cretácicas como las formaciones La Joya, Zuloaga, La Caja, Taraises, Tamaulipas Inferior, etc. a pesar de la actualización de esta geología, seguía sin estar registrada la Formación La Joya en Cerro Grande y sobre todo, la unidad más joven que se está ahora reportando y son las que se registran en este nuevo mapa, junto con el detalle estructural de estas unidades. La unidad más joven se identificó con el color (¿?) y se encuentra en la parte central del mapa, encima de la Formación La Joya, la cual corresponde al Jurásico Medio; se encuentra aflorando como alternancia de areniscas estratificadas de grano fino a medio en capas de 14 cm aproximadamente en tonalidades rojizas a verdosas por la afectación del intemperismo, presentan mucho cuarzo y hacia la cima se alterna con capas de filitas-limolitas (lutitas con metamorfismo de bajo grado) y conglomerados. La secuencia se presenta parecida a la descrita por Barboza-Gudiño *et al.* (2004) para la Formación La Joya en el área de la Sierra de Catorce, sin embargo, en el área de estudio la intercalación en las brechas varía en sus componentes, debido a que algunos estratos presentan componentes volcánicos y otros no. Esto último puede comprobarse con los resultados presentados en el capítulo 3, el cual corresponde a la petrografía de las rocas del área, un ejemplo de roca con clastos no volcánicos es la LB-09-31, se trata de una arenisca lito-cuarzosa, que si bien, contiene algunos líticos en muy baja proporción pero corresponden más a tipo sedimentarios, y para la muestra LB-13-18, se observa una brecha con composiciones volcánicas de rocas probablemente dacíticas, por mencionar algunos ejemplos, sin embargo, la mayoría del resto de componentes volcánicos son de tipo andesíticos-basálticos. Estos componentes probablemente sean parte de la Formación Nazas que subyace discordantemente a la Formación La Joya, lo interesante es que ésta última Formación no necesariamente presenta clastos de composición volcánica en todos sus horizontes, o al menos no están reportados aún para la zona, pero si los presenta hacia la cima y en la unidad más joven por definir, en la intercalación de brechas mencionadas anteriormente.

CONCLUSIONES

Se delimitó una unidad siliciclástica en la parte superior de la Formación La Joya, con una edad comparable a la de la parte inferior de la caliza de la Formación Zuloaga a nivel regional, con la que consecuentemente sería correlacionable y tendría una relación de transición lateral.

La unidad siliciclástica del Jurásico Medio-Superior en el área de La Ballena, Zacatecas, se encuentra sobreyaciendo a la Formación La Joya, presentándose como una secuencia de areniscas estratificadas de grano fino a medio en capas de 14 cm aproximadamente, en tonalidades rojizas a verdosas por la afectación de intemperismo, alternando con capas de filitas-limolitas y conglomerados.

Con base a las descripciones petrográficas hechas, se lograron determinar 3 petrofacies de areniscas muy claras, identificadas como A, B y C, que corresponden a A: feldespatos-cuarzosa, B: cuarcitas y C: cuarzo-feldespaticas, siendo las de tipo A las más abundantes, esto en concordancia con el tipo y ambiente geotectónico del depósito, procedencia y factores climáticos.

El ambiente sedimentario puede considerarse de litoral, por el retrabajamiento de algunos clastos que muestran regular esfericidad y alta redondez, posiblemente en una zona cercana a un canal distributivo, por la ocurrencia de facies conglomeráticas y con alguna fuente de procedencia de tipo ígneo posiblemente plutónico por la presencia de las petrofacies feldespatos-cuarzosas.

Con los análisis correspondientes a la geoquímica, se determinó que el origen de los circones detríticos estudiados tiene una afinidad a corteza continental de acuerdo con la relación U/Yb vs Hf(ppm), a un arco

magmático conforme la relación U/Yb vs Nb/Yb y así mismo, la relación de Th/U vs edades en Ma arrojan un origen ígneo de la mayoría de los circones de la muestra LBA-16-7.

De acuerdo con la distribución de edades analizadas en la parte de la geocronología, la población mayor corresponde al 49.33% de los circones analizados y se encuentra en un rango de edad que va de los 151.2 a los 173.3 Ma, que corresponde al Jurásico Medio-Superior; además de granos con edades Grenvilleanas, que conforman la segunda población más abundante, seguida de las poblaciones Permo-Triásica, Panafricana y Mesoproterozoica, que ocurren con una frecuencia similar en la muestra y finalmente en una proporción menor, aparecen edades del Paleozoico inferior y como un caso aislado, una edad del Arqueano.

Las edades más jóvenes que arrojaron los análisis U-Pb en circones de las areniscas de la unidad, rondan los 155.2 y 151.1 Ma por lo que esto situaría a esta unidad “joven” en el Jurásico Superior, abarcando desde el Kimmeridgiano hasta la base del Oxfordiano aproximadamente.

Referencias

- Almaguer-Rodríguez, 2010, Estudio Geoquímico de Elementos Traza en Unidades Volcánicas del CVSLP: Método ICP-MS (Validación del Método), Tesis de licenciatura, UASLP, 95 p.
- Barajas-Nigoche, L. D., 2008, Análisis de deformación en localidades de la secuencia siliciclástica marina del Triásico Superior de la Porción Occidental del Estado de San Luis Potosí, Tesis de maestría, Instituto de Geología, UASLP, 127 p.
- Barboza-Gudiño, J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P.R., 2004. Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 21 (3), 299-319. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n3a2>
- Barboza-Gudiño, J. R., Zavala-Monsiváis, A., Venegas-Rodríguez, G., Barajas-Nigoche, L. D., 2010, Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern Mexico: Tectonic setting and provenance, Geosphere, 6, 621-640. doi: 10.1130/GES00545.1
- Barboza-Gudiño, J.R. 2012. Sedimentary Tectonics and Stratigraphy: The Early Mesozoic Record in Central to Northeastern Mexico. In: Elitok, Ö. (ed). Stratigraphic Analysis of Layered Deposits.
- Bartolini, C., H. Lang, Cantú-Chapa A., and Barboza-Gudiño, J. R., 2001, The Triassic Zacatecas Formation in central Mexico: Paleotectonic, paleogeographic, and paleobiogeographic implications, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, eds., The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: AAPG Memoir 75, p.295-315. <http://dx.doi.org/10.1306/M75768C12>
- Bhatia, M.R., 1983, Plate tectonics and geochemical composition of sandstone: Journal of Geology, v. 91, p. 611-627. <http://dx.doi.org/10.1086/628815>
- Carrillo-Bravo, J., (1961), Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al N-W de Ciudad Victoria, Tamaulipas: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 13 (1-2), 1-98.
- Chávez-Aguirre, R., 1968, Bosquejo geológico de la Sierra Peñón Blanco, Zacatecas: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis profesional, 67 p.
- Götte, M., Michalzik, D., 1991, Stratigraphic relations and facies sequence of fan Upper Jurassic evaporitic ramp in the Sierra Madre Oriental (Mexico): Zentralblatt für Geologie und Palaeontologie, 6, 1445-1466.
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J., 1992, The real southern Basin and Range: Mid to Late Cenozoic extension, Geology, 20, 701-704.
- INEGI, 2001, Carta Topográfica LORETO F14A71, Zacatecas y San Luis Potosí, escala 1:50 000.
- Labarthe-Hernández, G.; Tritán-González, M., Aguillón-Robles, A., 1982, Estudio Geológico-Minero del área Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 76, 63 p.
- Loyola-Martínez, E., 2015, Datos para la reconstrucción paleoclimática del Jurásico Inferior a Medio en la Mesa Central de México, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 85 p.
- Mixon, B.R., *et al.*, 1959, Age and Correlation of Huizachal Group (Mesozoic), state of Tamaulipas, Mexico: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 43 (4), 757-771.
- Nieto-Samaniego, A. F., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVII,3, 285-318.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico, RL Sedlock, F., Ortega-Gutiérrez, RC Speed: Geological Society of America Special Papers, 278, 1-153.
- Petróleos Mexicanos, 1988, Estratigrafía de la República Mexicana, Mesozoico: México, D.F., Subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración, Informe Inédito, 216 pp.

- Rubio-Cisneros, I. I., Lawton, T. F., 2011, Detrital zircon U-Pb ages of sandstones in continental red-beds at Valle de Huizachal, Tamaulipas, NE Mexico: Record of Early-Middle Jurassic arc volcanism and transition to cristal extension. *Geosphere* 7 (1), 159-170. doi: 10.1130/GES00567.1
- Rubio-Cisneros, I. I., Ramírez-Fernández, J.A., García-Obregón, R., 2011, Análisis preliminar de procedencia de rocas clásticas jurásicas del valle de Huizachal, Sierra Madre Oriental: Influencia del vulcanismo sinsedimentario y el basamento cristalino: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol.63, 2, 137-156. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2011v63n2a1>
- Reguant, S., 1971, Los conceptos de facies en Estratigrafía: *Acta Geológica Hispánica*, t VI, 4, 91-101.
- Silva-Romo, G., 1994. Estudio de la Estratigrafía y Estructuras Tectónicas de la Sierra de Salinas. Edos. De S.L.P. y Zac., (MS Thesis). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 144 pp.
- Silva-Romo, G., *et al.*, 2000, A submarine fan in the Mesa Central, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 429-442. [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00034-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00034-1)
- Streckeisen, A.L. (1976) Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. *N. Jahrb. Miner. Abh.*, 107, 144-240 p.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., Mata-Segura, J. L., 1995; *Geología de la Hoja Presa de Santa Gertrudis, S.L.P.*, Instituto de Geología, UASLP, Folleto Técnico No. 122.
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology, *Geoscience Frontiers* 9 (2018), 1479-1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Wengler, M., 2014, Provenance análisis of Triassic and Jurassic sediments in NE Mexico, Master's thesis, Georg-August-University Göttingen, 176 p.
- Wengler M., Barboza-Gudiño J. R., Thomsen T. B., Meinhold G., 2019, Sediment provenance of Triassic and Jurassic sandstones in central Mexico during activity of the Nazas volcanic arc, *Journal of South American Earth Sciences*, 92, 329-349. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.009>
- Zavala-Monsiváis, A., Barboza-Gudiño, J. R., Velasco-Tapia, F., García-Arreola, M.E., (2011): Sucesión Volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 277-29. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n3a2>.

ANEXOS

Trabajos previos: Estratigrafía, petrografía y sus relaciones.

Silva-Romo (1994), hace un estudio de la estratigrafía y estructuras tectónicas de la Sierra de Salinas, en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas para proponer un modelo de evolución paleoambiental y tectónica para la región y establecer sus relaciones con áreas vecinas; haciendo énfasis en el registro estratigráfico del pre-Jurásico Tardío. Realizó estudios de fotogeología y cartografía para una interpretación tectónica, en el que el análisis estructural incluyó la elaboración de secciones geológicas y el análisis estadístico, rasgos planares y lineales de los pliegues, fallas e intrusivos, en proyecciones polares en la red de Schmidt. La parte estratigráfica la desarrolló a partir de estudios petrográficos, de procedencia de areniscas de acuerdo a los criterios de Dickinson (1985), macropaleontológicos y análisis químicos de las rocas ígneas; estos últimos los realizó efectuando un análisis de los elementos mayores expresados como óxidos de las rocas, que en este caso se trataron de cuatro muestras de granitos y una ignimbrita, con las que pudo determinar su composición con base a la saturación de alúmina según el índice de Shand y el cálculo normativo CIPW para la composición alcalina con la ayuda del diagrama Q'-ANOR de Streckeisen y Le Maitre (1979). Silva-Romo hace mención del conflicto y/o confusiones que han existido acerca de la secuencia marina del Triásico refiriéndose a su carácter litológico, su posición estratigráficas y su nomenclatura, por lo que propone la denominación informal de la Formación La Ballena para referirse a la secuencia turbidítica cuarcítica del Triásico Tardío; mientras que otros autores utilizan el nombre de Formación Zacatecas para referirse a la misma secuencia, pero con algunas variaciones de composición litológica en otras localidades, pero cercanas a las descritas por Silva-Romo. Esto es un ejemplo de la importancia de definir las formaciones detalladamente, para que el conocimiento de estas sea general y no conlleve a confusiones futuras.

Años más tarde, mismo autor Silva-Romo (2000), se mantiene enfocando sus trabajos a las mismas zonas de estudio y propone un modelo del ambiente de depósito en el que se ubicarían las rocas de su estudio anterior, basado en un abanico submarino; modelo que propone, basándose en un análisis de estudio composicional de areniscas de las formaciones La Ballena, Taray, Zacatecas y Nazas, que incluyen las áreas de La Ballena, límites de S.L.P. y Zac., San Rafael, Zac. y Real de Catorce, S.L.P.

Al año siguiente, Bartolini *et al.* (2001), trabajaron en las implicaciones paleotectónicas, paleogeográficas y paleobiogeográficas de la formación Zacatecas en el centro de México, incluyendo como localidades de estudio la ciudad de Zacatecas, la Sierra de Salinas, Zac. y Charcas, S.L.P., basándose en las relaciones estratigráficas, ambientes deposicionales, análisis de facies, distribución de faunas y en las configuraciones tectónicas que incluyen la deformación estructural de las áreas; éstos estudios se realizaron con la conjunción de la información obtenida de los afloramientos y trabajo de escritorio.

En 2004, Barboza-Gudiño *et al.*, hicieron aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México, con base a descripciones detalladas de cartografía, medición de perfiles estratigráficos, datos estructurales petrográficos, geoquímicos, sedimentológicos y geocronológicos. La Sierra de Catorce pertenece a la Provincia de la Mesa Central, en sus límites con la Sierra Madre Oriental y comparte las mismas formaciones que se han mencionado antes, la formación Zacatecas, formación Nazas, formación La Joya, entre otras como la formación Zuloaga, formación La Caja, formación Taraises, y la formación Tamaulipas Inferior, por mencionar algunas y también es importante su mención debido a que forman parte de la misma columna estratigráfica.

Trabajos previos: Geoquímica, Geocronología y sus relaciones.

De los primeros trabajos que se desarrollaron en el área que incluyeron, además de una descripción estratigráfica, análisis más detallados respecto a fechamientos de las rocas, se encuentra el de Barboza-

Gudiño *et al.* (2004), en el que con estudios de geocronología reportaron una edad absoluta para la Formación Nazas, obtenida por el método de U-Pb en circones; con esos datos analíticos y con un diagrama de concordia, identifican una intersección inferior a 172.3 ± 5.1 Ma, así como un dato de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de la fracción concordante que representa la más probable edad de la roca, de 174.7 ± 1.3 Ma (Bajociano). La roca que fecharon corresponde a un dique riolítico que intrusión a toda la secuencia volcánica y al cual le sobreyace de manera discordante la formación La Joya, la cual contiene fragmentos clásticos que han sufrido poco transporte, y son producto de la erosión del mismo dique.

Algunos años después, Barboza-Gudiño *et al.* (2010) hicieron un estudio acerca de la estratigrafía y facies del Triásico Tardío en el noreste de México, junto con sus configuraciones tectónicas y de procedencia. Para el estudio, los autores trabajaron con geocronología de U-Pb en circones detríticos para determinar la edad máxima del depósito, así como la procedencia de cuatro muestras de areniscas. Las muestras fueron recolectadas en Charcas, S.L.P., Sierra de Catorce, S.L.P., San Marcos, N.L., y El Cañón La Boca, Tamaulipas y fueron analizadas bajo un multicolector de ablación láser y espectrometría de masas acoplado a un plasma inductivamente (LA-MC-ICPMS) en un laboratorio de Arizona. El análisis fue realizado utilizando el método de ablación de circones con un láser New Wave/Lambda Physic DUV193 Excimer que opera con una longitud de onda de 193 nm, usando un diámetro de punto de 15-35 μm . El análisis del LA-ICPMS es particularmente adecuado para estudios de circón detrítico debido a la rápida generación de grandes conjuntos de datos y para estudios de este tipo se recomienda un análisis de aproximadamente 100 cristales de circón de cada muestra, que fue la cantidad que utilizaron para evaluar. Los autores mencionan que, para cada análisis, los errores en la determinación de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dan como resultado un error de medición de aproximadamente 1-2% en la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; los errores en la medición de $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ también resultan en aprox. 1-2% de incertidumbre en la edad para granos que son mayores de 1.0 Ga, pero son sustancialmente mayores para granos más jóvenes debido a la baja intensidad de señal en ^{207}Pb ; para la mayoría de sus análisis el cruce de precisión de las edades ocurre en 0.8 y 1.0 Ga. Las edades resultantes para estos análisis son representadas en diagramas de concordia y en gráficos de probabilidad de edades, en la figura 1 (A y B), se muestran ejemplos. Estos gráficos muestran cada edad y su incertidumbre como una distribución normal y agregan todas las edades de una muestra en una sola curva. En compañía de estos análisis, muestran los estudios petrográficos y sedimentológicos para correlacionar las secuencias y definir procedencias y una posible unión entre los depósitos fluviales del Triásico Tardío de la Fm. El Alamar y el "Potosí fan" de la Fm. Zacatecas a través de diagramas ternarios basados en el porcentaje de cuarzo, feldespatos y líticos en las rocas, según Dickinson (1985) que muestran las divisiones correspondientes a las procedencias de un arco magmático, un bloque continental y un orógeno reciclado como se muestra en la figura 2 (A), la cuál es sólo un ejemplo y no corresponde a ninguno de los estudios mencionados; mientras que en la (B), se muestra uno de los diagramas del estudio del que se está tratando y muestra que las rocas caen dentro de los campos de bloque continental y orógeno reciclado. En los métodos geoquímicos que emplean, muestran un diagrama de los elementos correspondientes a tierras raras normalizado a condritas (REE), donde todos muestran una anomalía negativa con el Eu, lo que indica una procedencia de rocas ígneas, que se forman por una diferenciación intracortical con fraccionamiento de plagioclasas en la corteza continental superior, características de una corteza continental superior con una procedencia de una corteza continental antigua (figura 3).

El trabajo anterior, es uno de los más completos en cuanto a metodologías similares que se emplean en el trabajo de tesis que se mencionó al principio y la cual se encuentra en desarrollo; además de ese, existen otros estudios más actuales como el de Zavala Monsiváis *et al.* (2011), en el que reportan datos

de campo, petrográficos, geoquímicos y geocronológicos de U-Pb en circones de una sucesión volcánica que sobreyace de manera discordante a sedimentos marinos de la formación Zacatecas y subyace en discordancia erosional a los depósitos clásticos de la Formación La Joya, del Calloviano-Oxfordiano, al poniente de Charcas, San Luis Potosí. En este trabajo además de emplear métodos de geoquímica que ya se han mencionado, utilizan también los elementos traza para determinar el ambiente tectónico mediante diagramas de multielementos (figura 4). También realizan análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar los elementos mayores de las rocas y espectrometría de masas acoplada a una fuente de plasma (ICP-MS) para la determinación de los elementos traza; además de la datación geocronológica U-Pb en circón de una muestra, por medio de un sistema de espectrometría de masas acoplado a plasma e integrado a un equipo de ablación láser (LA-MC-ICP-MS).

De los estudios más recientes afines a la zona de estudio, se encuentran los de Wengler (2014) y Wengler *et al.* (2019), el primero tuvo como objetivo identificar la relación y diferencias entre las áreas La Ballena, Charcas y Real de Catorce, así como un estudio de procedencia de las capas rojas del Jurásico en el noreste de México, y en el análisis determinó que los fragmentos volcánicos de las sedimentos han sido asignados a una edad Jurásica, pertenecientes a la Formación Nazas; sin embargo, los sedimentos sin fragmentos volcánicos son más representativos del Triásico Superior o del Jurásico Inferior. Para este trabajo se apoyó de análisis geocronológicos de U-Pb en circones. El segundo, fue un trabajo enfocado a la procedencia de los sedimentos del Triásico y Jurásico en areniscas del centro de México durante la actividad volcánica del arco Nazas con análisis petrográficos, geoquímicos, de minerales pesados (figura 5) y geocronología de circones detríticos U-Pb.