



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización de salares con
posible potencial de Litio en
Laguna Salada y Tulecheck, Baja
California, México.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Araceli Pérez Santiago

DIRECTORA DE TESIS

M. en C. Edith Fuentes Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, Universidad Nacional Autónoma de México, por tantos años de enseñanza desde que ingresé a partir de la preparatoria, por darme las herramientas necesarias para crecer profesionalmente, pondré en alto siempre a la Universidad.

Un agradecimiento al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología UNAM, y a cada uno de los involucrados que me apoyaron en la elaboración de esta tesis.

Al Quím. Rufino Lozano Santa Cruz, del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología, UNAM, por el apoyo a la realización de estos estudios y por el uso del equipo portátil de FRX Niton, muchas gracias por todas sus atenciones.

Al Dr. Augusto Rodríguez Díaz, muchas gracias por el apoyo brindado para el análisis de Espectrometría de Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) en el departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, UNAM.

A la QFB. Fabiola Vega García del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología, UNAM, gracias por todas las facilidades y apoyo para los estudios de Fluorescencia de Rayos X con el equipo Portátil Niton.

Al Ing. José Teodoro Hernández Treviño, gracias por la prestación de las instalaciones del taller de molienda del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, UNAM.

Al Sr. Carlos encargado del Laboratorio de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería, por la prestación de las instalaciones para efectuar parte del análisis granulométrico, muchas gracias.

A mis tutores, los M. C. Edith Fuentes Guzmán y M. C. Marco Antonio Rubio Ramos, muchas gracias de todo corazón por su enorme paciencia, apoyo, consejos y tiempo dedicado a la fecha, por abrirme las puertas a varias oportunidades en el ámbito profesional, además de siempre estar en la mejor disposición para ayudarme a culminar este trabajo de investigación, muchísimas gracias por todo.

Gracias a cada uno de mis sinodales de la Facultad de Ingeniería y del Instituto de Geología, M.C Emiliano Campos Madrigal, al Ing. Alfredo Victoria Morales y a QFB. Fabiola Vega García por su tiempo y apoyo en la revisión y corrección de mi trabajo de tesis.

A mis padres Efigenia y Vidal, ya que con su esfuerzo he logrado terminar esta etapa profesional, por siempre brindarme su apoyo, por creer en mí, por nunca dejarme caer, y darme aliento para seguir adelante, con mucho cariño este logro es para ustedes, especialmente a mi madre que siempre nos ha brindado todo el apoyo y la facilidad a cualquier cosa que queremos realizar, para mí y mis hermanos, los quiero mucho.

A mis hermanos Eloy e Iván, que siempre han estado conmigo apoyándome y estar cuando los necesito, a mis tíos, Edith que es como una segunda madre y que siempre está para apoyarme y darme ánimos, Ema, Eleazar y Silvina, por su cariño y apoyo, primos Diana, Bere, Erika, Paty, May, Erika C, por los buenos fines de semana en su casa además de las cenas, Beto por brindarme su ayuda en este ámbito de las Ciencias de la Tierra, gracias a todos.

A mi abuelita Luisa que siempre me da consejos, y apoyo para seguir adelante, abuelitos: Crisantos, Catarina y Gilberto, sé que estarán orgullosos de mí desde el cielo. A mis amigos entrañables de la Preparatoria y de la Facultad, Sam que siempre ha estado ahí y que me acompaña a lo largo de la carrera, compartimos los mismos gustos geológicos y metas, gracias por siempre escucharme y por tus consejos, Maribel gracias por tus consejos y apoyo incondicional en todo este camino, Mónica mi amigui del alma, gracias por este recorrido geológico lleno de risas y buenas convivencias.

INDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABLAS	12
1.1. Generalidades	14
1.2. Objetivo	15
1.3. Justificación	16
1.3.1. Ley de Transición Energética.....	19
1.4. El Triángulo de Litio	22
1.5. Arenas sílicas	31
1.6. Localización	44
1.6.1. Clima.....	44
CAPITULO 2. GEOQUIMICA DEL LITIO	46
2.1. Propiedades físicas y químicas del Litio	46
2.2. Tipos de yacimientos de litio	47
2.3. Importancia económica	53
2.4. Producción mundial de litio	55
2.5. Litio: políticas y regulación para el uso de energías limpias.	57
2.6. Usos y aplicaciones	59
CAPITULO 3. DEPOSITOS DE LITIO EN SALMUERAS	61
3.1. Generalidades	61
3.2. Ambientes evaporíticos	62
3.3. Formación de depósitos evaporíticos de litio	66
3.3.1. Minerales de litio asociados a salmueras	68
3.4. Procesos de beneficio (metalurgia del Litio)	73
CAPÍTULO 4. GEOLOGIA DE BAJA CALIFORNIA, NW DE MEXICO	75
4.1. Geología de la zona de estudio	75
4.1.1 El Cinturón Batolítico del oriente de Baja California.....	78
4.2. Apertura del Golfo de California	80
4.2.1. Tectónica del Golfo	84
4.3. Marco Geodinámico de Baja California	84
4.4. Geología estructural	87
4.4.1 Sistema de Fallas Transformantes Regionales activas.....	89
4.4.2. Lagunas tectónicas tipo Sierras y Cuencas (Basin and Range)	92

CAPITULO 5. METODOLOGÍA ANALÍTICA	93
5.1. Análisis Granulométrico.....	98
5.2.1 Espectrometría Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)	104
5.3.1. Analizador portátil de PXRF (NITON)	115
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	118
6.1 RESULTADOS.....	118
6.1.1 Análisis por Espectrometría de infrarrojo de onda corta (SWIR) en arenas	128
6.1.2 Conclusiones y recomendaciones	140
Bibliografía	142
ANEXOS.....	149

RESUMEN

Recientemente ha crecido la demanda a nivel mundial de Litio, ya que es la base para producir desde baterías para teléfonos, baterías de vehículos eléctricos, incluso para aviones de última generación, además de sus usos más convencionales en cerámica y fármacos, esto a su vez genera mayor interés en la búsqueda de éste mineral estratégico.

En México el Litio ha cobrado importancia ya que actualmente se tienen en etapa de exploración tres estados: Sonora, Zacatecas y Baja California.

En este trabajo de investigación se analizaron muestras de Laguna Salada y Tulecheck, Mexicali, Baja California, México, se aplicaron métodos analíticos geoquímicos como Fluorescencia de Rayos X y NITON (Fluorescencia de Rayos X portátil), y SWIR (Espectrometría Infrarrojo de Onda Corta), métodos analíticos que utilizamos para corroborar la presencia de Litio en la zona de interés, además del análisis sedimentológico de las arenas sílicas que nos dieron un aporte del tipo de ambiente de formación, aplicando su geoquímica para la obtención de parámetros químicos de calidad para las arenas de Sílice, esto para su potencial minero en la industria del vidrio.

Estos métodos analíticos geoquímicos son ideales en la exploración, ya que nos ayudan a tomar decisiones rápidas en campo, siendo eficientes tanto como las pruebas de laboratorio, pero en este trabajo de investigación estos métodos tienen una cierta limitante para detectar Litio, como sucede en cualquier proyecto de exploración no se encontraron indicios de este metal en las muestras de Laguna Salada, la zona posiblemente se encuentre enriquecida en Litio pero estas metodologías no fueron suficientes para detectarlo. Sin embargo, las arenas de Tulecheck cuentan con las especificaciones de calidad para su aprovechamiento para Sílice industrial en la zona.

ABSTRACT

Recently, the worldwide demand for lithium has grown, since it is the basis for producing from batteries for telephones, batteries for electric vehicles, even for the latest generation of airplanes, in addition to its more conventional uses in ceramics and pharmaceuticals, which in turn generates greater interest in the search for this strategic mineral.

In Mexico, lithium has gained importance since there are currently three states in the exploration stage: Sonora, Zacatecas and Baja California.

In this research work, samples from Laguna Salada and Tulecheck, Mexicali, Baja California, Mexico were analyzed using geochemical analytical methods such as X-Ray Fluorescence and NITON (Portable X-Ray Fluorescence), and SWIR (Short Wave Infrared Spectrometry), analytical methods that we experimented to corroborate any presence of Lithium in the area of interest, in addition to the sedimentological analysis of the silica sands that gave us an input of the type of formation environment, applying its geochemistry to obtain chemical parameters of quality for the Silica sands, this for its mining potential in the glass industry.

These geochemical analytical methods are very good in exploration, since they help us to make quick decisions in the field, being as efficient as laboratory tests, but in this research work these methods have a certain limitation to detect Lithium, as it happens in any exploration project no traces of this metal were found in the samples of Laguna Salada, the area is possibly enriched in Lithium but these methodologies were not enough to detect it. However, the Tulecheck sands have the quality specifications to be used for silica in the area.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Ubicación geográfica del Triángulo de Litio en Sudamérica, lo integran el salar de Atacama Chile, el salar del Hombre Muerto en Argentina y el Salar de Uyuni en Bolivia. Tomado de De la Hoz,2013.</i>	23
<i>Figura 1.2. Mapa Geológico del Salar de Atacama, Chile (Hiner, J. 2017)</i>	24
<i>Figura 1. 3. Mapa Geológico del Salar de Uyuni (Risacher, F. 1989)</i>	26
<i>Figura 1. 4 Mapa geológico del Salar del Hombre Muerto (Tomado de Vinante y Alonso, 2006).</i> .	30
<i>Figura 1.5 Cuarzo de las arenas sílicas de la zona de estudio LT-1</i>	34
<i>Figura 1. 6 Producción de Sílice en México en un periodo de 10 años, en este último cabe resaltar el incremento de 2 toneladas de producción en el año 2018. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).</i>	35
<i>Figura 1.7 Proceso de fracturación hidráulica utilizando como apuntalante la arena sílica. (CRU International Limited, 2018).</i>	42
<i>Figura 1.8 Consumo de arenas silíceas por país. (CRU International Limited, 2018).</i>	43
<i>Figura 1.9. Consumo histórico de arenas silíceas comprendido de 2008-2017. (CRU International Limited, 2018).</i>	44
<i>Figura 1.10 Localización de la zona de estudio (rectángulo rojo), perteneciente a Laguna Salada y área de Tulecheck. Mapa geológico del área de estudio adaptado de INEGI (1980a; 1980b) y Gastil et al. (1975). Modificado de García et al., 2001</i>	45
<i>Figura 1.11 Parámetros promedios respecto al clima de Laguna Salada, en el periodo de 1974-1990, Mexicali Baja California. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2020.</i>	46
<i>Figura 2. 1 Mina Greenbushes —extracción de Li-Ta-Sn en pegmatitas de tipo LCT Australia. Fuente: Olympus,2016</i>	53
<i>Figura 2. 2 Grafica que muestra el precio de Litio en el mercado internacional en un periodo de 15 años y mostrando un aumento significativo en los precios, (Metalary, 2020).</i>	54
<i>Figura 2. 3 Producción mundial de litio, tomado de Miranda,2009.</i>	56
<i>Figura 3. 1 Representación esquemática del control morfoclimático para la formación de salares (Euster y Hardie 1979; Ballivian, 1981).</i>	63
<i>Figura 3. 2 Esquema que muestra las principales características geológicas para la formación de salmueras de litio. Tomado de Bradley.2013.</i>	67
<i>Figura 3. 3 Acumulaciones de litio en depósitos salinos de diferentes orígenes (extraído de la base de datos SaltWorks® versión 1.7) (Warren, 2017).</i>	69
<i>Figura 3. 4 Hectorita (Hectorita blanca, policristalina, de grano fino, obtenido de Hector, San Bernardino Co., California, USA). (Mindat.org)</i>	70
<i>Figura 3. 5 Perfil geológico de SW-NE de la Mina de Héctor, donde se observa el emplazamiento de Hectorita, formado por alteración de ceniza volcánica y circulación de fluidos hidrotermales hipersalinos. (Warren, 2017).</i>	71
<i>Figura 3. 6 Jadarita, muestra obtenida del valle de Jadar, Serbia (Fuente Mindat.org)</i>	72
<i>Figura 3. 7. Obtención de litio y sus procesos de beneficio mediante Pegmatitas y Salmueras (Dirección General de Desarrollo Minero Litio,2017).</i>	73
<i>Figura 3. 8 Comparativa de costos de obtención de minería tradicional mediante extracción de Li en pegmatitas y extracción de Li en salmueras (Miranda,2009).</i>	74

<i>Figura 4.1 Mapa de Gastil et al. (1975), mostrando rocas plutónicas al sur de California y norte de Baja California. Zona A, poco profunda con rocas metamórficas y plutónicas. Zona B, intermedia. Zona C, zona profunda.</i>	76
<i>Figura 4.2 Mapa geológico regional. Tomado de Bernard (1968).</i>	77
<i>Figura 4.3 Cinturones batolíticos de Baja California. Tomado de Morán (1985).</i>	79
<i>Figura 4.4 Mapa de Baja California y sur de Norteamérica, mostrando el sureste de la provincia Basin and Range, y la provincia extensional del Golfo. Tomado de Stock y Hodges (1989).</i>	82
<i>Figura 4.5 Modelos propuestos para la apertura del Golfo de California, tomado de Fletcher et al. (2007).</i>	83
<i>Figura 4.6 Esquemas representando las tres formas de extensión de litosférica con base a su reología. Tomado de Durán, 2016.</i>	85
<i>Figura 4.7 Modelos de rifts de acuerdo con la fuente de los esfuerzos extensionales. a) Rift activo. Modificado de Bott (1992); b). Rift pasivo. Modificado de Schliische (2005). Tomado de Durán, 2016.</i>	86
<i>Figura 4.8 Proceso de subducción, donde la placa más densa es la que subduce, fundiéndose en el manto y generando magmatismo activo (plutónico y extrusivo) a lo largo de la zona de subducción. (SGM, 2019).</i>	87
<i>Figura 4.9 Principales fallas regionales al norte de Baja California. Rosales et.al., 2012.</i>	89
<i>Figura 4.10 Fallas regionales del norte de Baja California. Las estructuras se dividieron en dos grupos principales: las peninsulares (localizadas en tierra emergida) y, de borde (localizadas en ambiente marino).</i>	90
<i>Figura 5.1 Localización de las muestras del caso de estudio, modificado del mapa geológico-minero carta Mexicali III-12 escala 1:250 000. Se omiten coordenadas por confidencialidad.</i>	93
<i>Figura 5.2 a. Se programó el juego de tamices sobre la rot-tap con un tiempo de 10 minutos. b. Se registró el peso de cada fracción retenida en cada malla.</i>	95
<i>Figura 5.3 Selección de cuarzo, vista desde el estereoscopio con objetivo 40x.</i>	97
<i>Figura 5.4. Utilización del microscopio estereoscópico modelo Carl Zeiss, para la separación de cuarzo.</i>	97
<i>Figura 5.5 Trituración de muestras de cuarzo, arenas, arcillas y evaporitas en la pulverizadora del Instituto de Geofísica UNAM. Muestra pulverizada de evaporita LS-A-1.</i>	98
<i>Figura 5.6 Histograma representando la distribución granulométrica de los sedimentos, separados por tamiz. (Ridel, 2015).</i>	100
<i>Figura 5.7 Ecuaciones para calcular parámetros sedimentológicos (Folk, 1978).</i>	102
<i>Figura 5.8 Clasificación del ambiente sedimentario de la muestra respecto al valor de su Asimetría. (Bjorlykke, 1984).</i>	104
<i>Figura 5.9 Rango del espectro electromagnético, en este caso para la utilización de la técnica, va del rango de 10^{-6} y 10^{-4}. (Ojeda-Durán, 2018).</i>	105
<i>Figura 5.10 Espectros de reflectancia infrarrojo de onda corta (SWIR) de minerales típicos de alteración, (Kim, 2017).</i>	107
<i>Figura 5.11 Imagen del equipo OreXpress (Spectral Evolution) calibrando el equipo antes de realizar el análisis de las muestras.</i>	109
<i>Figura 5.12 Rayos X y otros tipos de radiación electromagnética. (Tomado de https://www.seekpng.com/ipng/u2w7i1e6i1u2t4q8_los-rayos-uv-de-menor-longitud-de-onda/)</i>	110
<i>Figura 5.13 Las tres principales interacciones de los Rayos-X con la materia, (Lozano, 2019).</i>	111
<i>Figura 5.14 Proceso de fluorescencia de rayos X. (Lozano, 2019).</i>	112

Figura 5. 15 Diseño básico de espectrómetros de ED-FXR (Primer figura arriba) y EW-FRX (segunda figura abajo). (Lozano, 2019).	113
Figura 5. 16 Espectro de una muestra de suelo medida con un espectrómetro de ED-FRX. (Lozano, 2019).	114
Figura 5. 17 Analizador de FRX portátil (modelo NITON X-L3t). Tomado Niton, 2010.	116
Figura 6. 1 Histograma que representa la distribución del tamaño de grano respecto al porcentaje en peso.	119
Figura 6. 2 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi.	120
Figura 6. 3 Histograma que representa la distribución del tamaño de grano respecto al porcentaje en peso.	122
Figura 6. 4 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi de la muestra LT-3.	123
Figura 6. 5 Histograma que representa el porcentaje en peso y el diámetro de las arenas expresadas en phi.	126
Figura 6. 6 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi.	126
Figura 6. 7 Espectro SWIR de la muestra LT-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul) perteneciente al mineral Nontronita con una correlación de 0.93.	128
Figura 6. 8 Espectro SWIR de la muestra LT-3 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de Nontronita de 0.928	129
Figura 6. 9 Espectro SWIR de la muestra LS-A-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.92 con Illita.	130
Figura 6. 10 Espectro SWIR de la muestra LS-L-A (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.916 con Montmorillonita.	130
Figura 6.11 Espectro SWIR de la muestra CP-b (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul) muestra una correlación de 0.964 Natrolita mineral que pertenece al grupo de las zeolitas.	131
Figura 6. 12 Espectro SWIR de la muestra 18-18 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.93 con Microclina.	131
Figura 6. 13 Espectro SWIR de la muestra CP-a (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.905 con Tenardita.	132
Figura 6. 14 Firma espectral del mineral Hectorita que muestra picos significativos de longitud de onda que coinciden con nuestra firma espectral de la muestra CP-a. Tomado de Spectral Library USGS 2020.	132
Figura 6. 15 Espectro SWIR de la muestra 18-18-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.942 con Microclina.	133
Figura 6. 16 Espectro SWIR de la muestra LS-4A (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.942 con Montmorillonita.	134
Figura 6. 17. Representación gráfica de la firma espectral, mostrando en el eje de las abscisas longitud de onda en nanómetros, y en el eje de las ordenadas reflectancia % de la muestra CP-a. Datos numéricos proporcionados por el software Spectral Evolution.	139
Figura 6. 18 Espectro de la muestra CP-a con diferentes longitudes de onda.	140

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. 1 Campos geotérmicos activos en México, en orden de mayor a menor capacidad eléctrica. (Modificado de CeMIEGeo, 2020).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1. 2 Valores promedio utilizados en la industria del vidrio, (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 1. 3 Especificaciones para arenas de vidrio de la Oficina de Normas de Estados Unidos. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 1. 4 Límites de tamaño de grano que se utilizan en la industria de vidrio. Tomado de Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2. 1 Propiedades Físicas de Litio. Datos obtenidos de Royal Society of Chemistry, 2019....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2. 2 Clasificación de los principales yacimientos de litio (Li), en función del ambiente de formación. Modificado de Gallego, 1992.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2. 3 Precio por tonelada expresado en dólares de Litio en el mercado internacional. Modificado de Metalary, 2023.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2. 4 Contenido promedio de Litio explotada en salmueras. (Garcés, 2012).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3. 1 Minerales en ambientes evaporíticos (Alonso, 2003).....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5. 1 Escala granulometría modificada de Udden-Wenworth (1957).</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 5. 2 Clasificación de partículas de acuerdo a la desviación estándar (Folk 1980).....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5. 3 Clasificación de la muestra respecto al parámetro de Curtosis. (Folk, 1980).....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5. 4 Clasificación de la muestra respecto a los valores de Asimetría (Folk, 1980).....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 6. 1 Datos obtenidos por tamiz muestra LT-1.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 6. 2 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 6. 3 Resultados obtenidos, parámetros estadísticos.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 6. 4 Clasificación de arenas basada en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017).</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 6. 5 Datos obtenidos del proceso de tamizado muestra LT-3.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 6. 6 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 6. 7 Resultados obtenidos, parámetros estadísticos.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 6. 8 Clasificación de arenas basadas en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017).</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 6. 9 Datos estadísticos de la muestra LS-A-1.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 6. 10 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 6. 11 Parámetros sedimentológicos</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 6. 12 Clasificación de arenas basada en clases en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017).....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 6. 13 Longitudes de onda para el espectro de Hectorita (Modificado de Spectral Library, 1996).....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 6. 14 Resultados de Fluorescencia de Rayos X sobre muestras LT-1, LT-1 QZ, LT-3, LT3QZ, LS-A-1.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 6. 15 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Mo, Zr, Sr, U, Rb, Th y Pb).135</i>	
<i>Tabla 6. 16 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Au, Se, As, Hg , Zn , y W) ..136</i>	
<i>Tabla 6. 17 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Cu, Ni, Co,Fe, Mn y Cr).137</i>	
<i>Tabla 6. 18 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (V, Ti, Sc, Ca, K, S).....137</i>	

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La exploración geológica es sumamente importante para la búsqueda de una gama de recursos pétreos en beneficio de la sociedad. Para este tipo de proyectos se hace un reconocimiento detallado del área (caracterización del sitio) para evaluar su potencial económico, ya sea para el ámbito minero, petrolero, hidrogeológico, o cualquier otra rama del sector industrial. Los estudios exploratorios se basan generalmente en herramientas analíticas que hacen eficiente la búsqueda de tales recursos, por lo que, para este trabajo de investigación se utilizaron metodologías geológicas y geoquímicas que permiten evaluar la zona de interés.

México cuenta con muchos recursos naturales, destacando la exploración de minerales estratégicos como Litio, elementos de tierras raras (REE), niobio , tántalo entre otros, además de la geotermia, suficientes para satisfacer las necesidades energéticas del país, por ello resulta lamentable que no se le haya dado la debida atención en el pasado, tal vez sea por intereses políticos o la costumbre de seguir en la comodidad de la dependencia del petróleo.

El objetivo de este trabajo (caso de estudio) consiste en la primera etapa de exploración para la determinación de recursos de litio en los sectores de Laguna Salada y Tulecheck, Cuenca de Mexicali, Baja California, México.

La región cuenta con elementos geológicamente muy interesantes, los tipos de roca, la tectónica reciente del sector NW de México, su cercanía con el Campo Geotérmico de Cerro Prieto y el clima costero del Pacífico mexicano. Estos elementos son piezas clave para la formación de potenciales salares de litio (Li), siendo de gran interés en los últimos años por la industria minera que se enfoca en la búsqueda de minerales estratégicos.

La geotermia es una rama de la ciencia aplicada que estudia los fenómenos térmicos del interior de la Tierra y los procesos requeridos para la explotación eficiente del recurso hidrotermal

asociado a una fuente de calor. Tal ciencia se enfoca en producir energía eléctrica para el abastecimiento industrial y doméstico. Actualmente en México solo se tienen cuatro campos geotérmicos en operación (Los Azufres, Los Humeros, Tres Vírgenes y Cerro Prieto) y algunos más en evaluación (La Primavera, Caldera Acoculco, entre otros). De estos campos geotérmicos en operación, dos se localizan en la península de Baja California: Cerro Prieto y Tres Vírgenes, cada uno satisfaciendo la demanda eléctrica que la región requiere. Destaca Cerro Prieto dado que es el campo geotérmico más grande de México y de Latinoamérica, generando 570 MWe (CeMIEGeo, 2020). Esta área es importante recalcar, dado que es muy cercana la zona de estudio, compartiendo similitudes con el campo geotérmico de Salton Sea (USA). En ambos casos, los sistemas están alojados en cuencas tectónicas activas de tipo “pull-apart” dentro de la Provincia de Salton Trough, conformada por los sistemas de fallas de Cerro Prieto e Imperial, mismos que son parte del sistema oriental de fallas regionales de San Andrés.

Los fluidos hidrotermales del campo geotérmico de Salton Sea (USA) registran altas concentraciones salinas, de las cuales resaltan la predominancia de litio, cuya extracción en comparación con la minería tradicional, es sumamente baja en costos y amigable con el ambiente. En este contexto se presuponen similitudes en cuanto a la tectónica de la región y la geología de la región de Laguna Salada y Tulecheck, siendo un buen indicio para la búsqueda de litio en ambientes evaporíticos en el NW de México.

- **1.1. Generalidades**

La transición hacia energías alternativas respecto al uso de hidrocarburos como fuente predominante de energía ha incrementado la necesidad de utilizar y buscar metales escasos en la naturaleza, esto con el único fin de no seguir contaminando y de no incrementar el calentamiento global. Dentro de estos minerales se encuentra el litio, un componente con carácter estratégico

clave para la producción de baterías de vehículos eléctricos o híbridos, que viene revolucionando su utilidad en estos últimos años, convirtiéndose en un metal de enorme interés a nivel mundial.

Los compuestos de litio son demandados alternativamente para la producción de cerámica, lubricantes, vidrio y aluminio primario. Su alta capacidad de calor específico hace que el litio sea ideal en aplicaciones de tecnología de transferencia de calor.

En estos últimos años se ha dado el reciente boom tecnológico mediante el desarrollo de las baterías de iones de litio, esto ha significado que el litio se convierta en un insumo prácticamente “insustituible” de la vida moderna, esto con el uso excesivo de celulares, computadoras etc., demanda que se ha incrementado en los últimos años por el uso y el progresivo avance de la tecnología, además de que necesita de una búsqueda exhaustiva de este metal.

El Litio (Li), con número atómico 3 y peso atómico de 6.9, es excepcionalmente pequeño y ligero. Las estimaciones de la abundancia promedio de la corteza de litio varían, pero es probable que sea de aproximadamente 17-20 ppm (Emsley, J. 2001). En las rocas ígneas la abundancia es típicamente de 28-30 ppm, pero en las rocas sedimentarias continentales, puede ser de hasta 53-60 ppm. Destaca en consecuencia su mayor producción en yacimientos de ambiente evaporítico, como los grandes salares de América del Sur. Los depósitos de tipo salmuera suman tres cuartas partes de la producción mundial de litio (Evans, 2014).

- **1.2. Objetivo**

Se emplearán metodologías de exploración geológica y geoquímica para describir las principales características de los depósitos salares de la Laguna de Tulecheck y Laguna Salada, Baja California, México. Se utilizarán herramientas analíticas como: Fluorescencia de rayos X (FRX) para arenas sílicas localizadas en el área para determinar la pureza de la sílice, (qué es de importancia adicional en la industria minera) y, espectrometría de infrarrojo de onda corta (SWIR),

con el objetivo de determinar la presencia de litio en evaporitas y arcillas que permitan evaluar su probable potencial económico como yacimiento de litio en México.

- **1.3. Justificación**

Con la nueva política gubernamental de energías limpias, México empieza con exploraciones novedosas enfocadas a la obtención de litio (desde su prospección, extracción, proceso de beneficio y manejo), dado que este metal cuenta con características físico-químicas que lo convierten en una excelente alternativa para la utilización y/o reconversión de energías menos contaminantes. Se examinará el potencial de Laguna Salada como fuente de Litio y Sílice para su aprovechamiento como recurso mineral.

Actualmente, se tiene contemplado en México, el proyecto de litio a cargo de la empresa Bacanora Minerals, ubicado a 180 kilómetros al noreste de Hermosillo, Sonora, dentro del municipio de Bacadéhuachi. Se ha publicitado como uno de los yacimientos más grandes del mundo, comparado con los mayores productores de este metal como Chile, Bolivia y Argentina. Además, se estima que tendrá una capacidad de producción de 17,500 toneladas anuales de carbonato de litio, con operación minera a cielo abierto y que se propone desarrollar en dos etapas, de acuerdo a los últimos datos obtenidos de la página oficial del proyecto Bacanora Minerals. La primera provee una capacidad de producción de 17,500 toneladas por año y la segunda con una capacidad de 35,000 toneladas por año.

Las rocas que afloran en Bacanora están representadas litológicamente por rocas volcánicas de las series basalto-andesita, riolita e ignimbrita, así como por dos horizontes de arcilla constituidos básicamente por material volcánico, los cuales contienen mineralizaciones de hectorita y polilitionita, siendo este último mineral una variedad de la lepidolita. (Dirección General de Desarrollo Minero Litio, 2018).

El país cuenta adicionalmente con tres proyectos en etapa de exploración en los estados de Baja California, San Luis Potosí y Zacatecas (Dirección General de Desarrollo Minero Litio, 2018). En Baja California, la empresa Pan American Lithium estudia el reprocesamiento de una salmuera residual, producto de la operación de la planta de generación geotérmica de Cerro Prieto, perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y, cerca de la zona-se lleva acabo exploración por parte de la compañía minera canadiense One World Lithium. Este último proyecto ha sido denominado El Salar del Diablo, y se ubica a 35 km del puerto de San Felipe (BC). Aproximadamente el 14% de la propiedad ha sido explorada mediante muestreo geoquímico, un estudio geofísico, mapeo geológico y análisis estructural de imágenes satelitales. El análisis geológico inicial indica un activo entorno estructural extensivo que incluye fallas de rumbos tanto norte-sur, como laterales en toda el área de prospección.

La compañía reporta, en una distancia de 80 kilómetros sobre el área, se tomaron 24 muestras de superficie y el estudio geoquímico indicó que contenían litio con una ley promedio de 74 partes por millón (ppm). Los resultados del estudio geofísico identificaron 3 grandes zonas altamente conductoras que cubren más de 54 kilómetros cuadrados y que pueden indicar la presencia de salmueras. Dentro de misma zona se tomaron 59 muestras para el respectivo estudio geoquímico, mostrando un grado promedio de 86 ppm de litio, definiendo una anomalía de 150 kilómetros cuadrados. Para muestras de superficie, estos grados de litio son similares a algunos que producen grandes depósitos a partir de salmueras. Las muestras también registraron alto contenido de potasio con 1.9%, un grado promedio de 400 ppm de boro, valores altos de cesio de hasta 10,000 ppm y un grado promedio bajo de 1.3% de magnesio (One World Lithium, 2020).

El proyecto que se pretende explotar en San Luis Potosí-Zacatecas, consta de un depósito de sales de litio y de potasio que se encuentra en sedimentos arcillosos y en salmueras de evaporación, formando lagunas, las cuales tienen forma semicircular a elipsoide y miden en promedio 2.5

kilómetros de largo por 1 kilómetro de ancho. Estas anomalías están distribuidas a lo largo de un alineamiento de 100 kilómetros de largo y dentro de cuencas endorreicas (Perfil de Mercado de Litio, 2018).

Los estudios realizados por la empresa Litiomex S.A. de C.V., indican que en Zacatecas existe un gran potencial, estimando recursos del orden de los 8 millones de toneladas de litio equivalente, y que pone en la mira para futuros inversionistas del mundo de la minería.

Este proyecto de investigación se realizó en la región de Laguna Salada y Tulecheck, Mexicali, Baja California. Es un nuevo prospecto para exploración minera enfocado a minerales estratégicos como el litio, ya que cuenta con los cinco atributos geológicos definidos por el USGS necesarios para concentrar litio en una salmuera como:

1. Una cuenca cerrada
2. Aguas termales
3. Posibles rocas volcánicas intermedias y ácidas enriquecidas con litio
4. Fallas activas que pueden permitir el transporte vertical de litio a la cuenca salar superficial.
5. Se encuentra dentro de una región de alto flujo de calor.

Se realizará el respectivo estudio para verificar que estos depósitos de salmuera se encuentren enriquecidos en Litio y como alternativa en caso de no hallarse, se hará análisis de la pureza de la sílice de las arenas de granito que se encuentran en el área de estudio, de gran interés para la industria del vidrio y farmacéutica.

1.3.1. Ley de Transición Energética

Los países desarrollados han promovido y convenido la meta de disminución de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) para enfrentar los efectos adversos derivados del calentamiento global. Esto hace prever el aumento necesario de otras fuentes de energía que sean bajas en emisiones de tales gases, por lo que, en el caso de México, se implementó la Ley de Transición Energética, publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 24 de diciembre de 2015. Esta ley busca generar un cambio en las políticas y medidas para impulsar el aprovechamiento energético de recursos renovables, así como, la progresiva sustitución de combustibles fósiles, con la consecuente reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica.

Dentro de esta ley se encuentran dos artículos que es de interés recalcar, siendo de gran importancia para este trabajo de investigación:

Artículo 1.- “La presente Ley tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos”.

Artículo 32.- “El aprovechamiento sustentable para la producción de energía eléctrica a partir de los cuerpos de agua, los bioenergéticos, el viento y los recursos geotérmicos, así como la explotación de minerales asociados a los yacimientos geotérmicos, se sujetará y llevará a cabo de conformidad con las disposiciones jurídicas aplicables”.

Sobre el artículo 32, menciona el aprovechamiento sustentable de los recursos geotérmicos del país, los cuales están a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Estos recursos se evalúan a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, quienes operan a la fecha cuatro campos geotérmicos para la generación de energía eléctrica en el país (Tabla 1.1) con una capacidad total instalada de alrededor de 931 MegaWatts eléctricos (MWe). Un campo

geotérmico en operación adicional está a cargo de la empresa privada Grupo Dragón, cuya generación de energía eléctrica es suficiente para satisfacer las necesidades promedio de dos millones de hogares mexicanos.

Tabla 1. 1 Campos geotérmicos activos en México, en orden de mayor a menor capacidad eléctrica. (Modificado de CeMIEGeo, 2020)

Campos geotérmicos activos en el país	Capacidad Instalada (MWe)
Cerro Prieto, Baja California	570
Los Azufres, Michoacán	248
Los Humeros, Puebla	94
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	10
Domo San Pedro, Nayarit	10

La geotermia, además de ser una industria productiva, es una ciencia aplicada de geofísica y geología que se enfoca en el estudio del origen y las condiciones térmicas a profundidad de la Tierra y es aún una de las fuentes renovables menos conocidas. Esta energía se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y está frecuentemente ligada a sistemas volcánicos cuyas expresiones superficiales son aguas termales, fumarolas y géiseres. La fuente de calor proviene del interior de la Tierra y es consecuencia, por un lado, de la desintegración de isótopos radiactivos, y por otro, de cuerpos magmáticos asociados a movimientos diferenciales entre las distintas capas profundas que constituyen la estructura terrestre, así como del calor latente producto de la cristalización del núcleo externo (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Los primeros intentos a nivel mundial para la generación de electricidad con energía geotérmica, comienzan con los experimentos en Italia el 8 de mayo de 1818, cuando el comerciante de origen

francés Francesco Giacomo Larderel comenzó las obras cerca del pueblo de Montecerboli. Larderel creó sus propias instalaciones y fueron las primeras capaces de aprovechar las aguas geotérmicas para la producción de ácido bórico. Sin embargo, el aprovechamiento como energía geotérmica para producir electricidad inició a principios del siglo XX, cuando el príncipe Piero Ginori Conti consiguió canalizar el calor proveniente de la Tierra en una dinamo capaz de encender cinco bombillas. (Enel Green Power,2018)

En 1916, la central eléctrica de Italia, construida en 1913, ya producía 2750 Kw, una potencia suficiente para generar electricidad para el pueblo de Larderello y la cercana Volterraplanta (250 KWe). En 1958 comienza la producción geotermoeléctrica en Nueva Zelanda. (Enel Green Power,2018)

En México los primeros estudios para utilizar los recursos geotérmicos para generar electricidad ocurrieron hasta inicios de la década de los cincuenta del siglo XX. A fines de 1959 se inauguró el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, ubicado a unos 300 km al norte de la Ciudad de México, con una planta de 3.5 MW de capacidad. Esta fue la primera planta geotermoeléctrica que se instaló en el continente americano y estuvo funcionando parcialmente hasta 1973, cuando fue desmantelada. (Nieva, D. et al 2013)

En 1958 se realizaron los primeros reconocimientos geológicos en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CG-CP). En abril y octubre de 1973 empezaron a operar las dos primeras unidades de 37.5 MW cada una y, actualmente es considerado el segundo campo más grande del mundo. (Nieva, D. et al 2013)

Nuestro país se encuentra en una región geográfica cuya capacidad generativa a partir de energía geotérmica es altamente deseable y valorada por otros lugares y gobiernos del mundo. El aprovechamiento de la energía geotérmica en México se ha incentivado en estos últimos años, en

parte debido a la creación de la Ley de Energía Geotérmica. No obstante, debe admitirse que, aun desarrollando la totalidad de los recursos con que cuenta el país, la energía geotérmica no podría cubrir la demanda total dado el crecimiento poblacional actual. Aun así, la abundancia de campos geotérmicos en México, como una fuente de energía alterna y menos contaminante sí puede representar una contribución significativa para satisfacer las necesidades energéticas del país, sin pasar por alto su utilización directa en procesos industriales. El concepto de USO de la energía geotérmica aún debe implementarse y podría significar un considerable ahorro de combustibles fósiles y una disminución en los niveles de contaminación. De la misma forma, tampoco se debe dejar de lado la exploración hacia los minerales estratégicos asociados, aquellos que son necesarios para su uso industrial, militar o para fines comerciales y que son esenciales para la utilización de energías eficientes en la sociedad moderna.

- **1.4. El Triángulo de Litio**

En Sudamérica se encuentra el 85% de las reservas más rentables de litio de origen evaporítico. A esta región se le denomina como el “Triángulo del litio”, el cual está conformado por los salares andinos de Argentina, Bolivia y Chile (Figura 1.1).

Chile es el productor mundial número uno de carbonato de litio desde 1997. Las reservas chilenas son controladas por dos de las más grandes corporaciones mineras de litio y que dominan el mercado: Chemetall, una subsidiaria de Rockwood Holdings Inc., y Soquimich (SQM), una compañía del estado chileno. Ambas compañías producen 70% de todo el carbonato de litio del lucrativo Salar de Atacama en Chile. (Miranda, 2009)

Los yacimientos de litio boliviano más grandes se encuentran en el Salar de Uyuni, perteneciente al Departamento de Potosí. Aunque las reservas son enormes, la explotación no está libre de dificultades, pues los costos de extracción hacen que la producción de litio en Bolivia sea más cara que en Chile y Argentina debido a que en el Salar de Uyuni, el material está mezclado con otros elementos, especialmente con potasio, boro y magnesio. La transformación a carbonato de litio, requiere, además, el desarrollo de una nueva tecnología de evaporación, ya que, en esta región del Altiplano Boliviano, en contraste con los dos países vecinos, hay una temporada de lluvias de tres meses de duración.



Figura 1.1 Ubicación geográfica del Triángulo de Litio en Sudamérica, lo integran el salar de Atacama Chile, el salar del Hombre Muerto en Argentina y el Salar de Uyuni en Bolivia. Tomado de De la Hoz, 2013.

En Argentina, desde hace 15 años se explota el Salar del Hombre Muerto, en la provincia de Catamarca, por la transnacional FMC Lithium Corporation a través de su subsidiaria Minera del Altiplano S.A. FMC tiene tres plantas en el Salar del Hombre Muerto: planta de absorción selectiva para remover el litio de la salmuera natural, de servicios auxiliares que abastece de electricidad, vapor y aire comprimido al Complejo Industrial y la de carbonato de litio. Su procesadora de cloruro de litio está en General Güemes, Provincia de Salta y produce 3.700 toneladas anuales de carbonato de litio, (LITIO la paradoja de la abundancia ,s.f).

Salar de Atacama (Chile)

El salar de Atacama se encuentra en una cuenca cerrada de 14,800 km² entre la Cordillera de los Andes al este y la Cordillera de Domeyko, al oeste (Figura 1.2). El salar cuenta con una superficie de 3000 km² y altura de 2300 msnm, siendo el más grande de Chile.

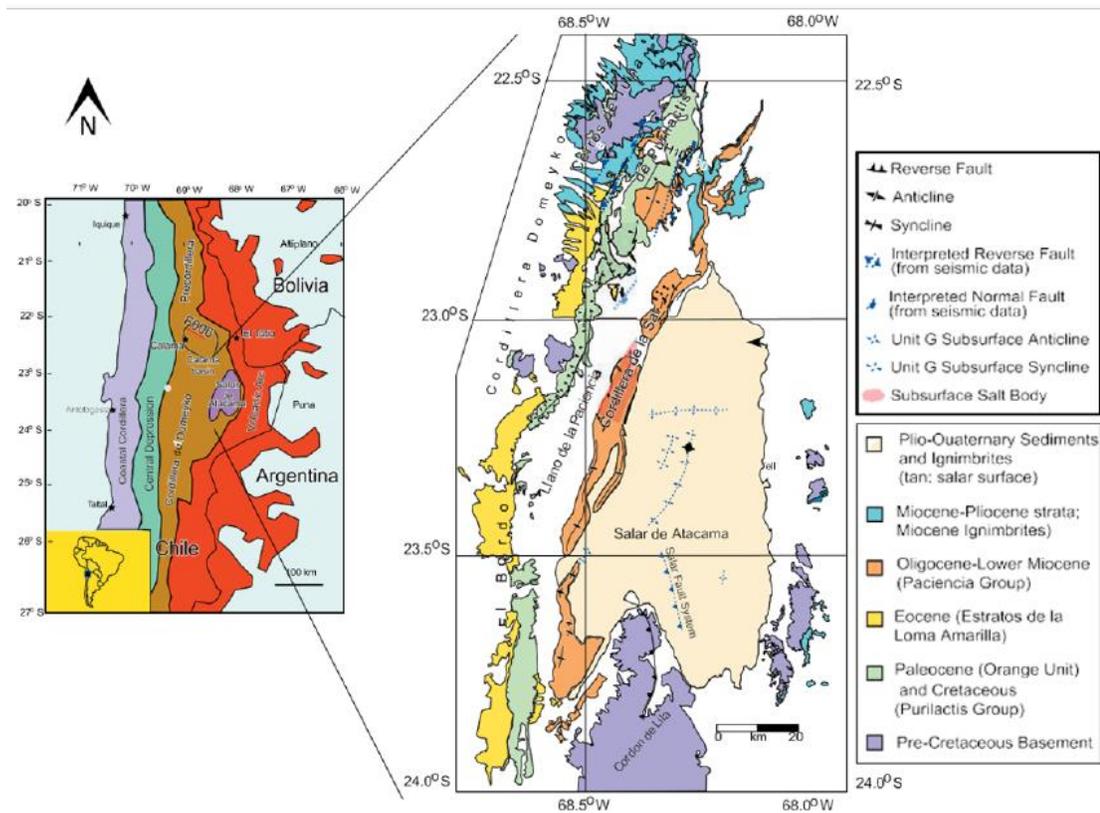


Figura 1.2. Mapa Geológico del Salar de Atacama, Chile (Hiner, J. 2017)

Este salar es una cuenca intramontañosa endorreica, formada por sedimentos clásticos y evaporíticos depositados desde el Mioceno superior hasta la actualidad. La Cordillera de los Andes que rodea al Salar por el lado Este, está constituida por ignimbritas y volcanes de composición ácida (dacitas, andesitas, riolitas) de edad Cenozoica, además se encuentran algunos afloramientos de rocas sedimentarias más antiguas, como areniscas, conglomerados y lutitas. (Hiner, J.,2017).

La Cordillera de Domeyko del lado Oeste del Salar, es una compleja sucesión de formaciones volcánicas y sedimentarias de edad Paleozoica a Terciaria, donde predominan, por lo menos en superficie, rocas sedimentarias como lutitas, areniscas, conglomerado y yeso (De Silva & Francis, 1991). La cuenca se encuentra cerrada al sur por el Cordón de Lila, donde predominan rocas intrusivas como granitos, granodioritas de edad Paleozoica a Cretácica.

Entre la Cordillera Domeyko y la Cordillera de los Andes se encuentra un cordón de rocas evaporíticas continentales, la Cordillera de Sal compuesta por yeso y halita, de edad Oligoceno, y que divide la depresión central en dos subcuencas: la del Salar de Atacama propiamente dicha y la del Llano de la Paciencia. Esta formación parece proseguir por debajo de las ignimbritas en el sector noreste del salar (Ramírez y Gardeweg, 1982).

Se puede distinguir dos grandes unidades en el Salar (Bevacqua, 1992):

1. El núcleo; constituida principalmente por un 90% de halita porosa impregnada con una salmuera intersticial muy rica en Li, K, Mg y B. Cuenta con una superficie de 1,100 km² de superficie y 900 metros de espesor.
2. Zona marginal: constituida por sedimentos finos, ricos en sulfatos, especialmente yeso.

La deposición de evaporitas en la cuenca del salar ha durado, al menos, desde el Oligoceno, se puede considerar un proceso de deposición continuo desde esta época.

El clima es muy árido y presenta una marcada zonación longitudinal. Las precipitaciones, que ocurren de enero a marzo, disminuyen desde 300 mm/año en la Cordillera de los Andes hasta 5 mm/año en la Cordillera de Domeyko. La evaporación ha sido estimada en 2000 mm/año, temperatura promedio es de 14°C con extremos entre 4°C y 25°C (Alonso, 1996).

Salar de Uyuni (Bolivia)

El Salar de Uyuni se encuentra localizado en el Altiplano Boliviano, una cuenca cerrada de 200,000 km² y una altitud de 4000 metros. La cuenca se encuentra entre la Cordillera Oriental y Occidental de los Andes (Figura 1.3).

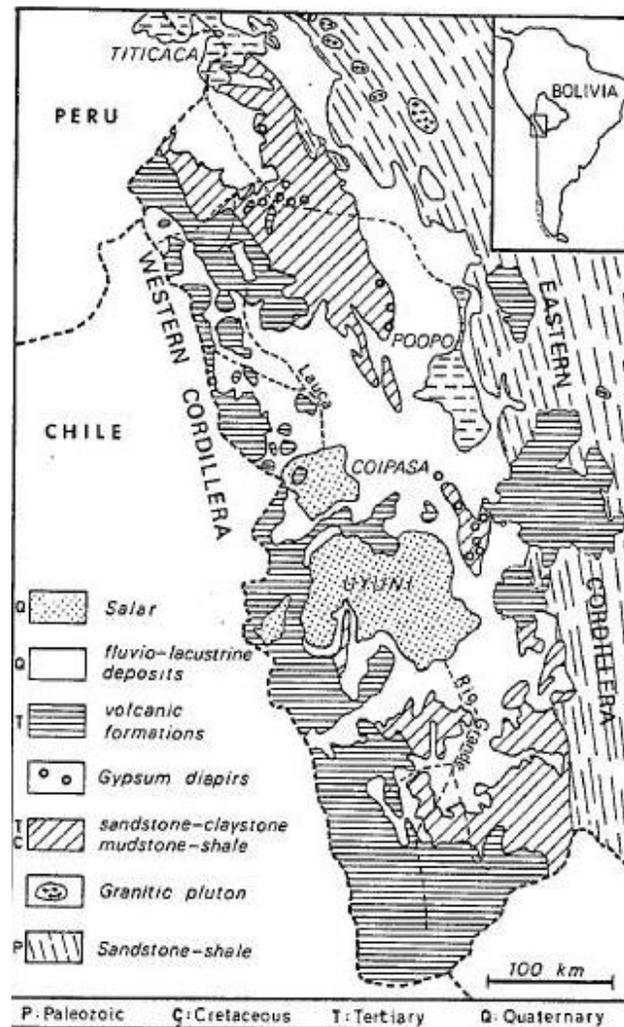


Figura 1. 3. Mapa Geológico del Salar de Uyuni (Risacher, F. 1989).

La exploración en este salar comenzó en el año de 1976 cuando el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) detectó la presencia de litio en las salmueras de Uyuni, el mismo año el Convenio UMSA-ORSTOM puso en evidencia una fuerte correlación entre litio, potasio y boro en las salmueras de los salares del Altiplano. En el año 1978 una misión conjunta UMSA-GEOBOL-ORSTOMUSGS perforó dos pozos en el Salar de Uyuni con una perforadora rotativa liviana, en estos dos lugares la costra de sal tenía 6-8 metros de espesor y estaba totalmente impregnada de salmuera, por debajo se encontraron sedimentos lacustres. (Risacher, F.1989)

El Altiplano se encuentra en una zona de fuerte inestabilidad climática, fases húmedas y que han seguido durante todo el Cuaternario. En cada época húmeda el Altiplano se inundaba. Así se establecieron sucesivos lagos salados, cada paleo-lago probablemente disolvía una parte de la costra de sal depositada por el lago anterior (Ahlfeld, 1972). En general el Salar de Uyuni se conforma como una unidad morfoestructural denominado Altiplano, éste a su vez presenta una estratigrafía distinta según sea el sector (Figura 1.3). Por ejemplo, el Altiplano Norte, se caracteriza por presentar diferentes tipos de rocas, pertenecientes al Devónico, constituidas por areniscas y lutitas. En los alrededores del Lago Titicaca, afloran rocas del Carbonífero, constituidas por intercalación de areniscas blanquecinas y limos gris verdoso. Cabe señalar que también se identificaron calizas fosilíferas, en alternancia con lutitas gris oscuras, correspondientes al Pérmico (Ahlfeld, 1972).

El Terciario se encuentra representado por rocas sedimentarias de la Formación Umala. Son características en el Río Desaguadero la presencia de areniscas, arcillas y conglomerados y que están difundidas sobre el Altiplano norte. Hacia el sector NW, afloran ignimbritas de composición riódacítica de la Formación Pérez.

El sistema Cuaternario se encuentra distribuida en el Plano Norte, en capas subhorizontales de tobas, ignimbritas y coladas de lava.

El vulcanismo comenzó a finales del Cretácico o principios del Terciario con la extrusión de las lavas alcalinas de Potoco que son de menor extensión. El vulcanismo más joven, que comenzó en el Mioceno y continúa en la actualidad, es de composición calci-alcalina e incluye ignimbritas surgidas de grandes calderas y lavas asociadas con estratovolcanes. En general, las ignimbritas disminuyen en edad hacia el oeste y se cree que son la fuente más probable de mineralización de litio y boro. Las ignimbritas incluyen partes de la Formación Quehua superior del Mioceno en el este, la Formación Los Frailes del Mioceno en el noreste y la Formación Ignimbrita del Plioceno al sur y al oeste (Ahlfeld, 1972). También hay cuerpos de domo de riolita dispersos. Se conocen volcanes compuestos tan antiguos como el Mioceno, pero la mayoría han entrado en erupción durante el Holoceno. La cuenca de drenaje del Salar de Uyuni contiene muchas fuentes termales enriquecidas en Li, B y otros elementos relacionados con el vulcanismo continuo.

El clima de la región es seca y fría, con precipitaciones bajas, radiación solar intensa y fuertes vientos, el clima se caracteriza por dos estaciones según Mariaca (1985):

-Época fría y seca de abril a noviembre (invierno), la temperatura mínima es de -20°C y la máxima 10°C .

-Época menos fría y húmeda de diciembre a marzo (época de lluvia), la temperatura mínima es de -5°C y la máxima es de 25°C .

Respecto a la evaporación, ésta es intensa debido en gran parte a la radiación solar. Los productos generados por la escasa precipitación se ven disminuidos por la evaporación, que presenta valores extremos de hasta 6 mm diarios. En épocas de lluvia el salar se inunda, lo que hace imposible todo trabajo, cabe resaltar que su evaporación es de 1000 a 1500 mm/año (Ballivian, 1981)

En la investigación hecha por Ballivian (1981), para el enriquecimiento de Litio en el salar menciona que para “Los Salares del Altiplano Boliviano”, se tienen grandes concentraciones de elementos como Li, K y B, los cuales se ubican en aquellas áreas que reciben la influencia directa de las rocas ignimbríticas, o rocas de composición riodacíticas, las cuales se encuentran mayormente afectadas por intemperismo. Ballivian (1981) concluye en la investigación que la fuente o el origen de estos elementos, provienen del intemperismo y lixiviación operando sobre las rocas volcánicas, ya que estas, por procesos mecánicos y químicos de meteorización, se desintegran y se forman nuevos depósitos.

Salar del Hombre Muerto (Argentina)

El salar se ubica en el borde centro oriental de la provincia geológica Puna, en una zona con amplia distribución de yacimientos de borato. El salar está dividido en dos subcuencas, la occidental y la oriental, ambas separadas por el islote central de Farallón Catal. La altitud del piso salino es de aproximadamente 4000 msnm y constituye un típico depósito evaporítico emplazado en rocas pre-Paleozoicas, Paleozoicas y Cenozoicas (Turner 1972). El área posee características favorables para la explotación de litio dado que contiene anomalías de este elemento a una profundidad de 70 metros y en concentraciones mucho más uniformes que las registradas en formaciones similares del noroeste argentino. Las reservas ascienden a 850,000 toneladas y la concentración promedio del mineral es de 692 ppm. Además, posee una elevada tasa de evaporación, y escasa presencia de impurezas (magnesio), lo cual abarata el proceso extractivo.

El islote conocido como Farallón Catal, tiene una extensión de aproximadamente 72 km² y ocupa una posición central en la depresión por lo que la divide en dos subcuencas, una oriental y otra occidental (Figura 1.4).

Las dos subcuencas se diferencian por el contenido de sales presentes. Mientras la subcuenca oriental es boratífera y con bajo contenido en cloruros, la subcuenca occidental se comporta composicionalmente de forma inversa. Superficialmente son también muy diferentes: la oriental presenta una resolución superficial limo arcillosa dominante de color pardo que puede estar cubierta por una delgada costra salino-yesífera, mientras que la occidental presenta tanto en superficie como en profundidad potentes acumulaciones de halita. Como rasgo sobresaliente en el interior del salar se destaca la presencia de plataformas travertínicas (Vinante y Alonso, 2006).

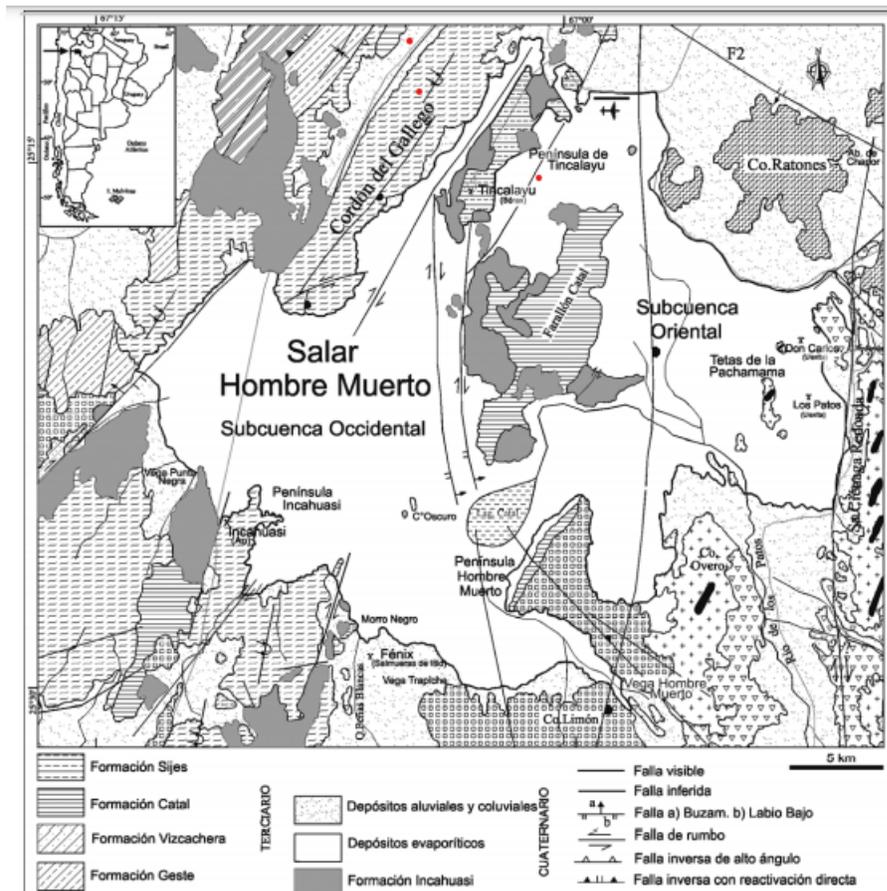


Figura 1. 4 Mapa geológico del Salar del Hombre Muerto (Tomado de Vinante y Alonso, 2006).

Las dos subcuencas se diferencian por el contenido de sales presentes. La subcuenca boratífera oriental es de bajo contenido en cloruros, mientras que la subcuenca occidental se comporta composicionalmente de forma inversa.

Las rocas aflorantes más antiguas en el salar corresponden a rocas metamórficas de la Formación Pachamama de edad Neo-Proterozoica. La litología está compuesta básicamente por esquistos micáceos, para- y ortogneis, intercalados por calcosilicatos y anfibolitas (Aramayo, 1986).

El Ordovícico está representado por grauvacas, pelitas y lavas de las Formaciones Tolillar. En discordancia angular se encuentran los conglomerados y areniscas rojas de la Formación Geste (Turner 1964) asignada al Eoceno medio (Alonso y Fielding 1986). Por encima se reportan conglomerados, areniscas y pelitas rojas con yeso de la Formación Catal (Alonso y Gutiérrez 1986). De edad más joven afloran sedimentos y evaporitas (boratos y halita) de la Formación Sijes (Turner 1964). Vinante y Alonso (2006) en el artículo “Evapofacies del Salar Hombre Muerto, Puna Argentina: Distribución y Génesis”, los autores realizaron previamente análisis de imágenes satelitales, y determinaron el porcentaje de las distintas unidades estratigráficas aflorantes en la cuenca hidrográfica, reportando su porcentaje por edades en: Precámbrico 10%, Paleozoico 25%, Terciario sedimentario 5%, Terciario volcánico 35%, Cuaternario (detrítico + evaporítico + basaltos) 25%. En la depresión de Hombre Muerto predomina estructuralmente un estilo tectónico relacionado con sistemas transcurrentes (Jordan *et al.*, 1999).

El clima en esta zona en verano varía entre los 33° y 19 °C, mientras que en invierno la máxima es de 21° y la mínima de -11°C. La precipitación en el área es de 100 mm anuales (Viewweather, 2020).

- **1.5. Arenas sílicas**

Las arenas sílicas han sido utilizadas para la producción de vidrio y en fundiciones, así como también en otros sectores menores, como aplicaciones químicas y de relleno. Desde 2014, el sector

más grande de uso final ha sido para la fracturación hidráulica (fracking) en la industria del petróleo y del gas.

Las arenas sílicas es un tipo de arena de con una alta proporción de SiO₂, y la mayoría de los usos requieren de una ley superior al 95%. También se conoce como arena industrial, y se diferencia de las arenas que se usan para propósitos básicos de construcción principalmente por su contenido de sílice, además por otros atributos físicos como la dureza, la geometría del grano, su resistencia a la compresión entre otros.

Según la USGS, los recursos y reservas definidos de arenas silíceas son extensos y se produce en una gran cantidad de países. EEUU ha sido por muchos años el principal productor, esto debido a la calidad de sus yacimientos.

La sílice se puede encontrar en la naturaleza en tres formas principales (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

Puras

Bajo esta forma se localiza como cristal de roca o veta de cuarzo, en donde el mineral es obtenido del núcleo central de pegmatitas zonales, de vetas, diques y tapones de dentro de otras rocas. Se cree que los principales depósitos se formaron por procesos hidrotermales, algunos depósitos aparecen como relleno de fisuras y relleno de cavidades y en menor medida en cuerpos de reemplazamiento metasomático. La principal fuente de cuarzo puro son las intrusiones graníticas asociadas a pegmatitas microclínicas. Las vetas macizas de cuarzo de origen hidrotermal tienen una estructura zonal constituida por varias generaciones de cuarzo.

Arenas no consolidadas

La arena sílica con estas características comprende el material de cuarzo que ha sido segregado o desprendido de rocas de diversos orígenes y que ha sido refinada por procesos naturales de intemperismo y erosión. Este tipo de arenas se concentran para formar yacimientos casi monomineral de aceptable pureza. La forma desconsolidada se presenta en forma de arena de ríos, playas y dunas. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

Rocas consolidadas

En este tipo de rocas destaca la cuarcita, la cual es una roca metamórfica de gran dureza, derivada de la arenisca formada por la compactación y metamorfismo de areniscas cuarzosas. La cuarcita presenta un amplio rango de variación en textura, friabilidad, color y pureza química en función del material presentado en la cementación, tamaño del grano y composición mineral de la roca de arena donde se encuentra originalmente.

La arenisca es una roca sedimentaria compuesta principalmente por granos de cuarzo segmentados y unidos por materiales silícicos, ferruginosos, calcáreos y arcillosos. Sus impurezas detríticas comunes son los feldespatos, micas y una amplia variedad de minerales pesados. El grado de dureza de la arenisca varía desde extremadamente cementada hasta mineral pobremente consolidado.

Propiedades de la sílice

El cuarzo SiO_2 es el principal constituyente de las arenas de sílice y proviene de rocas ígneas tanto intrusivas como extrusivas, además de rocas sedimentarias como la arenisca. Debido a su alta estabilidad química y física, es el mineral detrítico más abundante, y entre todos los minerales casi el único que constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de SiO_2 (46.7% de Si y 53.3% de O_2).

Aparece con frecuencia como mineral de ganga en los yacimientos metalíferos. El cuarzo presenta impurezas aun en los cristales más perfectos, como Li, Na, K, Al, Fe, Mn, Ti, Ca y Mg, con frecuencia inclusiones de rutilo, hematita, clorita y mica. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).)

Tiene una dureza de 7 en escala de Mohs (Figura 1.5), peso específico de 2.65, índice de refracción de 1.548, carece de exfoliación evidente; tiene propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas.

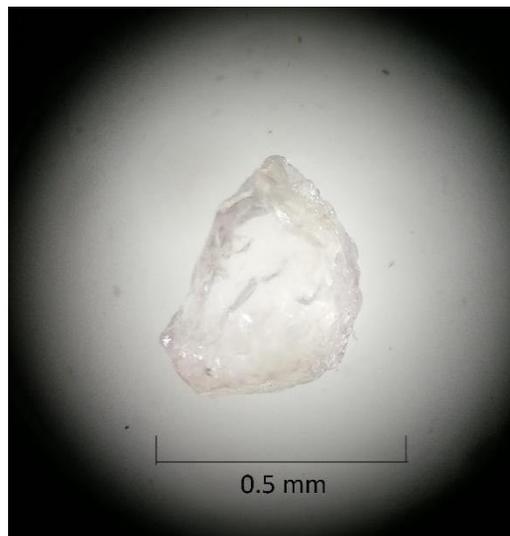


Figura 1.5 Cuarzo de las arenas sílicas de la zona de estudio LT-1

Los principales minerales silíceos son el cuarzo, la calcedonia y aunque puede ocurrir en formas semiamorfas como ópalo o ágatas. Se encuentra cuarzo en la mayoría de las rocas magmáticas, sedimentarias y metamórficas. Es un elemento característico de los granitos, los gneises y las cuarcitas. La formación u origen de la sílice más o menos impura constituye toda una familia de minerales, entre los cuales destacan las distintas variedades del cuarzo o cristal de roca, de calcedonia, sílex, ópalo, etc. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

Potencial geológico minero en México de arenas sílicas.

En México la producción nacional de sílice, en 2018, fue de 4.5 millones de toneladas (Figura 1.6), lo cual representó un incremento del 92% con respecto a lo registrado en 2017. Los

principales estados productores son Veracruz (57%), Coahuila (40%), Baja California (2%) y Sonora (1%) (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

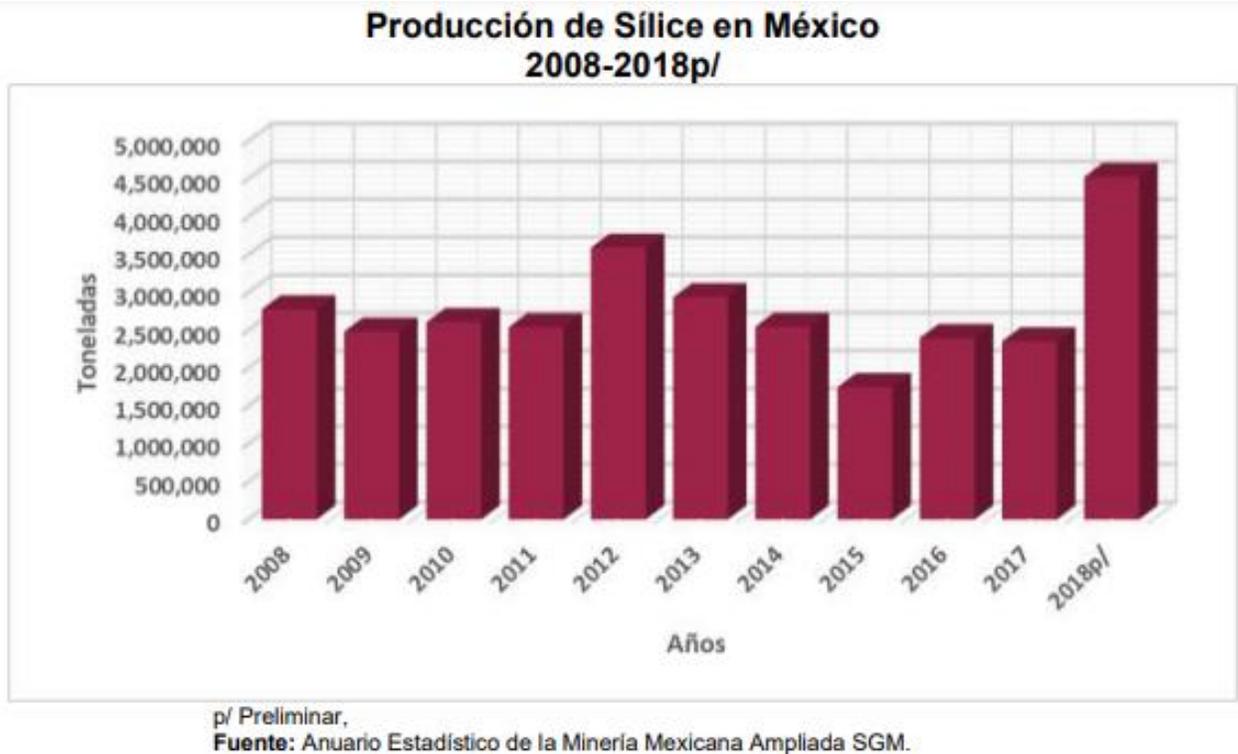


Figura 1. 6 Producción de Sílice en México en un periodo de 10 años, en este último cabe resaltar el incremento de 2 toneladas de producción en el año 2018. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

Los principales estados productores, así como su origen, tipo de depósito y ambiente geológico son:

Veracruz

El Distrito Minero de Jaltipan es la principal zona productora de sílice. La arena sílica de la región se aloja en la Formación Filisola del Mioceno medio (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021). Son arenas de origen marino provenientes de aguas someras, su formación se debió al proceso de intemperismo y erosión. La arena sílica explotada presenta acumulación de óxido de fierro en capas superficiales, provocando un color rojizo a la vista, siendo necesario realizar un proceso de lavado y/o flotación para eliminar el óxido de fierro.

Coahuila

En el municipio de Hidalgo, en la parte noreste del estado de Coahuila, a 60 km en línea recta al N45°W de la ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas, los afloramientos corresponden a areniscas del Eoceno, probablemente pertenecientes a la Formación Carrizo, dentro de la cual se encuentran las areniscas "Once Lomas", que son unas arenas de dunas y que corresponden a los cuerpos de interés económico.

En el municipio de Ocampo Coah., el yacimiento es originado por la alteración in situ de rocas ígneas sometidas a intemperismo químico, por lo que los feldespatos fueron transformados a montmorillonita y por efecto de lixiviación bajo condiciones ácidas se desintegran los minerales arcillosos y se separan el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 ocasionando así el enriquecimiento de la sílice. (Dirección General de Desarrollo Minero Sílice, 2021).

San Luis Potosí

En el municipio de Villa de Reyes el depósito de arena sílica es de origen residual, el cual está acompañado de arcillas, micas y materia orgánica, cuyas arenas fueron concentradas a partir de la descomposición y arrastre de las riolitas.

En ocasiones, la sílice se presenta en forma de arena y grava cuarcíferas que pueden ser explotadas sin ninguna preparación minera; frecuentemente, se encuentran formando parte de areniscas y conglomerados. Los depósitos de este material se encuentran relacionados con el Campo Volcánico de San Luis Potosí, de donde procede una cierta cantidad del mineral por la desintegración, el acarreo y la sedimentación natural de cuarzo provenientes de las rocas ígneas. (Dirección General de Desarrollo Minero Sílice, 2021).

Métodos de extracción y procesamiento de arenas sílicas.

Este material es muy abundante y posee propiedades físicas que incluyen una alta resistencia al calor, y alta dureza, cualidades muy valiosas en la producción industrial.

Si el contenido de SiO_2 es bajo, la arena puede tener considerables impurezas, lo que ocasiona defectos en la calidad de los artículos y además hace inoperante la producción por las continuas limpiezas de los hornos de fundición.

La reducción del nivel de impurezas y la obtención de un tamaño deseable del producto son objetivos clave de estos procesos de beneficio.

En las plantas de procesamiento, la sílice pasa por un tratamiento químico especial para retirar el exceso de impurezas de hierro, aluminio, metales pesados, para destruir películas de óxido y para filtrar los granos que no poseen la resistencia necesaria. Las arenas silíceas pasan por una pantalla vibratoria, donde se eliminan las partículas de tamaño excesivo. Luego se lavan y secan los granos de arena usando clasificadores de rastrillo, arrastre o tornillo. Podría ser necesario el frotado de las arenas para obtener el tamaño de partícula deseado (CRU International Limited, 2018).

Las arenas frotadas (cribado y tamizado) se procesan aún más para eliminar los lodos e impurezas remanentes de las etapas anteriores. Se podrían realizar procesos más sofisticados para limpiar el producto según las especificaciones requeridas, como flotación por espuma y separación por gravedad, usando clasificadores de espiral. En los casos donde el contenido de minerales de hierro sea alto, se usará la separación magnética húmeda de alta intensidad para eliminar más aun las impurezas. (CRU International Limited, 2018).

Para su uso efectivo, el material procesado se divide en fracciones según la composición de los granos y tamaño de las partículas. Para esto, se procesa el mineral con una pantalla, por un tamiz. Primero se filtra la fracción más pequeña, de 0,1-0,6 mm, y el material que queda se transfiere a la pantalla siguiente con una malla más grande.

Una vez filtrados según tamaño de partículas, el producto podrá ser vendido en estado húmedo o seco. Para el uso de material húmedo en la producción de ciertos trabajos se requiere un nivel

particular de humedad. Las arenas síliceas para cada industria deben cumplir con un estándar específico. Para la producción de vidrio, esta cifra debería ser de menor a un 7% mientras que, para el arenado o procesos de fundición, la humedad no debería superar el 0,5%. Se usan hornos especiales para el secado de las arenas, donde la temperatura alcanza los 800°C. (CRU International Limited, 2018).

Principales usos de las arenas síliceas en la industria

Las arenas de sílice se valoran por una combinación de propiedades químicas y físicas. Estos incluyen un alto contenido de sílice en forma de cuarzo y, lo que es más importante: niveles muy bajos de impurezas perjudiciales, particularmente arcilla, óxidos de hierro y minerales refractarios, como la cromita. Por lo general, tienen una distribución estrecha del tamaño de grano (generalmente en el rango de 0.5 a 0.1 mm). Para la mayoría de las aplicaciones, las arenas de sílice deben ajustarse a especificaciones muy definidas, y la consistencia en la calidad es de vital importancia. (British Geological Survey, 2009).

Arenas síliceas para la industria de vidrio

Los fabricantes de vidrio se preocupan principalmente por la composición química de las arenas de sílice y, en particular, el hierro, el cromo y otros contenidos minerales refractarios. Los requisitos de calidad dependen del tipo de vidrio que se fabrica (principalmente si es incoloro o de color) y, en cierta medida, de los requisitos del fabricante de vidrio.

La arena para envases de vidrio incoloro generalmente tiene un contenido de hierro de $<0.035\%$ Fe_2O_3 (óxido de hierro férrico), para vidrio en el rango de 0.040 a 0.1% Fe_2O_3 , y para envases de color 0.25% –0.3% Fe_2O_3 . Sin embargo, lo importante es la composición general del lote de vidrio y los niveles más bajos de hierro en un componente pueden compensarse con niveles más altos en otro. (British Geological Survey, 2009).

A continuación, se muestran los valores tolerables para la industria del vidrio (Tabla 1.2)

Tabla 1. 2 Valores promedio utilizados en la industria del vidrio, (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
± 0.25%	± 0.10%	± 0.10%	± 0.10%

Las cantidades tolerables de impurezas de óxido de hierro y titanio son mínimas y se aceptan para la fabricación de vidrio ámbar o de botella. Los compuestos de calcio y magnesio son nocivos en el caso de vidrios solubles, debido a que afectan esta propiedad. Los óxidos de aluminio menoscaban la transparencia y hacen más difícil la fundición.

En cuanto a los porcentajes de especificación para los diferentes tipos de vidrio se presentan en la tabla 1.3.

De los requisitos físicos más importantes de las arenas de cuarzo son el tamaño y la forma de los granos, objeto principal de la granulometría. En la tabla 1.4, se establecen los límites de tamaño del grano requeridos para la fabricación de vidrio.

Tabla 1. 3 Especificaciones para arenas de vidrio de la Oficina de Normas de Estados Unidos. (Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021).

Tipo de Vidrio (Calidad)	SiO ₂ % Min	Al ₂ O ₃ % Max	Fe ₂ O ₃ % Max	CaO+MgO % Max
Óptica	99.8	0.1	0.22	0.1
Cristal de mesa	98.5	0.5	0.35	0.2
Cristal de Flint	95	4	0.06	0.5
Vidrio cilindrado, varilla y vidrio pulido	98.5	0.5	0.06	0.5
Vidrio natural, vidrio para ventana	98.5	0.5	0.3	0.5
Vidrio natural, vidrio para ventana	95	4	0.3	0.5
Vidrio verde	98.5	0.5	1	0.5
Vidrio ámbar	95	4	1	0.5

Tabla 1. 4 Límites de tamaño de grano que se utilizan en la industria de vidrio. Tomado de Dirección General de Desarrollo Minero Silice,2021

Malla Tyler N°	Abertura (mm)	Retención en la malla señalada
20	0.83	0%
42	0.3	20%
100	0.147	90%
200	0.74	100%

Los porcentajes de calidad anteriores se refieren a granos comprendidos entre 0.2 mm a 0.5 mm con sólo un poco más del 1% entre 0.01 mm y 0.1 mm. Estos datos se tomarán en cuenta para el análisis granulométrico de la zona de estudio.

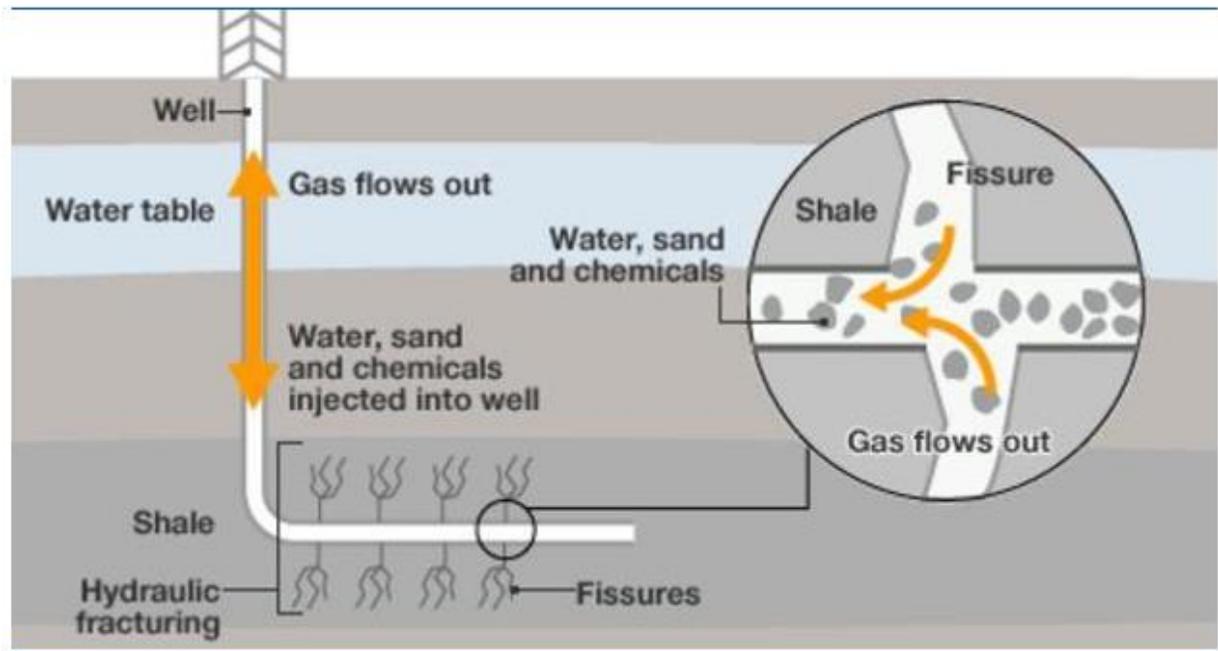
Fracturación hidráulica para extracción de hidrocarburos

La industria petrolera es la principal consumidora de arena sílica, principalmente en el proceso de fracking, mismo que sirve para fracturar la roca, mantener apertura de poro y en consecuencia liberar gas natural e hidrocarburos ligeros.

La arena sílica actúa como un apuntalante, éste término es usado en la industria petrolera, para cualquier tipo de sustancia natural o sintética que ayuda a mantener abierta la fractura después de que el fluido de inyección (fluido fracturante) es dejado de bombear y dicho fluido es removido del yacimiento, esto cuando la corriente de agua a alta presión obliga a los pequeños poros a convertirse en fracturas más grandes, la arena mantiene estas fracturas abiertas para continuar liberando combustibles fósiles.

Los fluidos del yacimiento pueden así fluir rápidamente a través de los canales conductivos creados artificialmente en el yacimiento. Cuando se apagan las bombas de agua, las fracturas deben mantenerse abiertas para que no se cierren los poros de los que se deriva el gas natural y el petróleo. (Black Mountain Sand, 2019).

Por eso, es tan importante que un apuntalante sea lo más duradero y resistente posible. Cuanto más tiempo aguante éste contra la enorme presión de las fracturas, más petróleo se puede extraer, maximizando la eficiencia del pozo. (Figura 1.7).



Fuente: BBC

Figura 1.7 Proceso de fracturación hidráulica utilizando como apuntalante la arena sílica. (CRU International Limited, 2018).

La especificación para esta industria requiere granulometría comprendida de la malla 12 a la 20 (1.397 - 0.833 mm) y de la 20 a la 42 (0.833 - 0.351 mm) cuando el pozo ha bajado su producción y de esta forma pueda estimular su producción normal. (Dirección General de Desarrollo Minero, 2021).

Demanda y producción de arenas sílicas.

El fracking representa un 41% de la demanda total, seguido del vidrio (25%) y de fundiciones (21%). Otros usos (13%) incluyen su aplicación química y como uso en rellenos, además de otros usos menores.

En 2017, EEUU fue la región con mayor demanda de arenas silíceas, representando un 45%. Esto se debe a su dominio en el mercado global industrial y al rápido crecimiento del sector de fracking. China es el segundo mayor mercado, con un 20%, seguido de países con mercados menores, como Alemania, Italia, Malasia, Canadá y Japón. (CRU International Limited, 2018). (Figura 1.8).

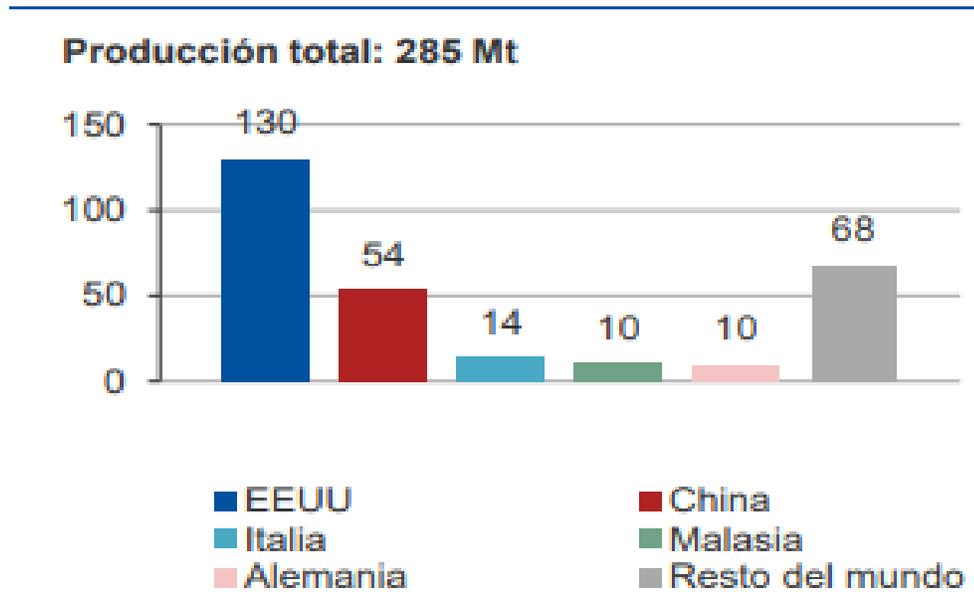


Figura 1.8 Consumo de arenas silíceas por país. (CRU International Limited, 2018).

EEUU representó un 45% de la demanda total, con un 86% de demanda por fracking, 12% por vidrio y 7% por fundición, aumentando su participación de apenas un 16% en 2008. China ahora representa un 20% de la demanda de arenas silíceas a nivel global, un alza del 14% en 2008, con un crecimiento en la demanda del 11,7% de la TCAC para este periodo. (CRU International Limited, 2018). (Figura 1.9).

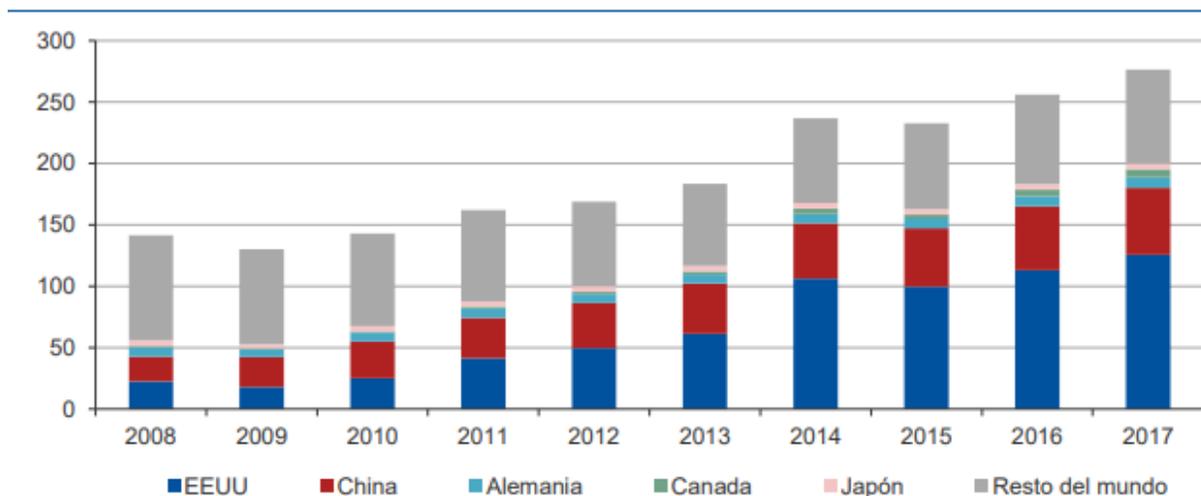


Figura 1.9. Consumo histórico de arenas silíceas comprendido de 2008-2017. (CRU International Limited, 2018).

• 1.6. Localización

La zona de estudio se localiza en la parte NW de México, en Laguna Salada de la Cuenca de Mexicali, Baja California. La zona está dentro de la región meridional de la gran Cuenca de Salton, que abarca desde Salton Sea, en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California, México. A escala continental, forma parte del régimen tectónico del sistema occidental del Sistema de Fallas San Andrés, conformado por fallas dextrales transcurrentes con desplazamientos normales, de dirección general NW-SE (Figura 1.10).

1.6.1. Clima

Un factor importante para el desarrollo de una salmuera potencialmente enriquecida en litio, es el clima, lo cual permite que, a altas temperaturas el agua se evapore, aumentando la concentración y precipitación de sales. A nivel mundial, las salmueras de litio se producen en los cinturones latitudinales áridos a ambos lados del ecuador, con las zonas favorables situadas entre latitudes aproximadamente 19 ° y 37 ° norte o sur.

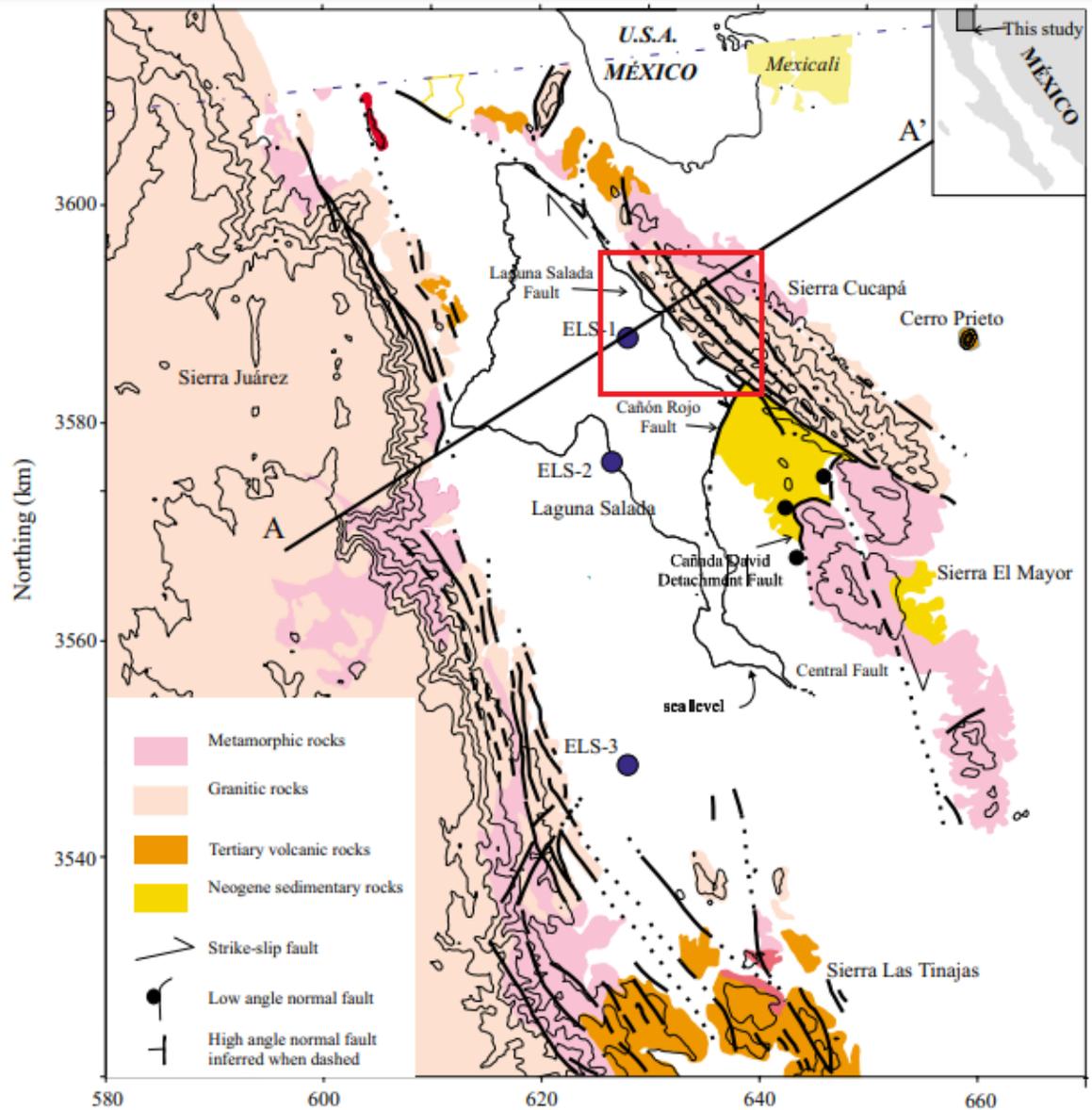


Figura 1.10 Localización de la zona de estudio (rectángulo rojo), perteneciente a Laguna Salada y área de Tulecheck. Mapa geológico del área de estudio adaptado de INEGI (1980a; 1980b) y Gastil et al. (1975). Modificado de García et al., 2001.

El área de la Laguna Salada tiene un clima seco desértico y, al ser una zona debajo del nivel del mar, las temperaturas pueden llegar a superar los 50 °C (Figura 1.10). En el verano, las temperaturas máximas son de aproximadamente 43 °C y en el invierno se acercan a los 20 °C. Mientras que las temperaturas mínimas oscilan entre los 25 °C en verano hasta los 4 °C en invierno. La Laguna Salada recibe una precipitación anual promedio de 67.6 milímetros (Servicio Meteorológico Nacional, 2020).

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. abs. (°C)	29.0	35.0	39.0	42.0	46.0	49.0	50.0	48.0	48.0	48.0	35.0	43.0	50.0
Temp. máx. media (°C)	20.9	23.1	25.8	30.3	34.4	40.8	43.4	43.0	37.7	32.4	25.5	20.8	31.5
Temp. media (°C)	12.8	15.1	16.9	20.0	23.9	30.2	34.3	33.9	29.4	23.5	17.1	12.6	22.5
Temp. mín. media (°C)	4.8	7.1	8.1	9.6	13.3	19.6	25.1	24.7	21.0	14.7	8.7	4.4	13.4
Temp. mín. abs. (°C)	-8.0	-3.0	0.0	2.0	3.0	10.0	12.0	11.0	9.0	2.0	-2.0	-7.0	-8.0
Precipitación total (mm)	7.4	7.2	1.3	1.4	0.6	0.0	3.8	11.0	11.8	5.4	2.1	15.6	67.6
Días de precipitaciones (≥ 0.1 mm)	1.0	0.7	0.3	0.3	0.2	0.0	0.4	1.0	0.9	0.4	0.5	1.2	6.9

Figura 1.11 Parámetros promedios respecto al clima de Laguna Salada, en el periodo de 1974-1990, Mexicali Baja California. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2020.

● CAPITULO 2. GEOQUIMICA DEL LITIO

● 2.1. Propiedades físicas y químicas del Litio

El litio deriva de la palabra griega "lithos", que significa piedra. Es un elemento químico que encabeza la familia de los metales alcalinos y forma parte del grupo número 1 de la tabla periódica: es metálico, blanco plateado, químicamente reactivo, es el más ligero en peso de todos los metales, y con bajo punto de fusión (Tabla 2.1). El núcleo del átomo está constituido por tres protones y tres neutrones. Cristaliza en el sistema cúbico, sus electrones libres se desplazan dentro de la red cristalina con suma facilidad pudiendo conseguir y transferir cargas negativas a través de su estructura con muy poca resistencia, lo cual le confiere las propiedades de ser un excelente conductor de la electricidad.

En cuanto a sus propiedades físicas, quizás la más destacables son: el alto calor específico, su alta conductividad térmica, baja viscosidad y muy baja densidad.

El litio se extrae a partir de tres tipos de depósitos: salmueras, rocas sedimentarias (arcillas) y roca dura (pegmatitas). Se encuentra presente en una amplia gama de minerales (se reportan aproximadamente 145 especies mineralógicas), aunque sólo algunas de éstas poseen valor

económico. En las rocas sedimentarias su distribución es muy irregular, si bien presenta una ligera tendencia a concentrarse en sedimentos arcillosos de ambiente oceánico. Mención aparte merecen las evaporitas, ya que presentan concentraciones muy variables, pudiendo albergar depósitos de gran interés económico, como por ejemplo los grandes Salares de América del Sur.

Tabla 2. 1 Propiedades Físicas de Litio. Datos obtenidos de Royal Society of Chemistry, 2019

Número atómico	3
Peso atómico	6.94
Conductividad eléctrica	$10,8 \times 10^6 / \text{m } \Omega$
Densidad (g/ml)	0.53
Dureza	0.6
Punto de ebullición °C	1330
Punto de fusión °C	180.5
Electronegatividad	1.0
Calor específico	3.6 J/gk

- **2.2. Tipos de yacimientos de litio**

Las características fisicoquímicas del Li (Tabla 2.1) condicionan su comportamiento geoquímico y distribución en los diferentes tipos de rocas. En procesos magmáticos su radio iónico impide su entrada en la mayoría de minerales (excepto micas), por lo que se concentra preferentemente en los magmas y fluidos hidrotermales residuales. Esto explica su abundancia en rocas muy diferenciadas tales como granitos, riolitas, sienitas nefelinitas y pegmatitas. Con base en esto, puede establecerse una clasificación de yacimientos de Li en dos grandes grupos, según se trate del ambiente de formación, ya sea sedimentario o de origen ígneo (Tabla 2.2).

- Yacimientos de litio de origen sedimentario-salmueras:

Bajo este nombre se agrupa un conjunto de yacimientos que consisten en salmueras subsuperficiales muy enriquecidas en Li. La abundancia es resultado de procesos exógenos naturales de lixiviación de rocas con altas concentraciones del elemento. Además, en este ambiente el litio tiende a disolverse tanto en aguas continentales como marinas (Róslér y Lange, 1972). Reciben esta denominación debido a que en Sudamérica este tipo de salmueras dan lugar a depósitos salinos de gran extensión, elevadas concentraciones del metal y alto valor económico.

Las salmueras se caracterizan por sus altos contenidos de cloruros, sulfatos, carbonatos y boratos y, una distribución, por orden de abundancia, de los principales cationes en solución: Na, Ca, K, Mg, Li, Rb, Cs.

Tabla 2. 2 Clasificación de los principales yacimientos de litio (Li), en función del ambiente de formación. Modificado de Gallego, 1992.

YACIMIENTOS DE LITIO				
AMBIENTE		TIPO	PROCESO	LOCALIZACIÓN
SEDIMENTARIO	SALMUERAS	Salares	Lixiviado de rocas ricas en Li en zonas de clima muy árido	Salar de Atacama (Chile), Salar de Uyuni (Bolivia), Salar de Hombre Muerto (Argentina) Searles Lake y Salt Lake (USA)
		Salmueras geotérmicas	Fuentes termales (hot springs) y geysers que lixivian Li en la	Campo Geotérmico de Salton Sea (USA)

			proximidad de un foco térmico.	
		Salmueras en campos petroleros	Descomposición de materia orgánica y lixiviado de rocas	Pennsylvania y Michigan (USA)
	HECTORITAS		Formación de minerales ricos en Li por evaporación	Hector y Overton Valley (USA)
MAGMÁTICO	PEGMATITAS GRANÍTICAS, GRANITOS Y MINERALIZACIONES HIDROTERMALES.		Concentración de Li, Rb y Cs en magmas peraluminosos muy diferenciados.	Kings Muntains (USA) Greenbushes (Australia) Tanco (Canadá)

La generación de yacimientos tipo salar está condicionada predominantemente por dos factores (Gallego, 1992):

1. Geológicos

- a) Existencia de cuencas cerradas que favorezcan la concentración y precipitación de sales, evitando la dispersión de los elementos en solución.
- b) Presencia en las proximidades de la cuenca o en el subsuelo de rocas enriquecidas en Li que alimenten la salmuera.
- c) Sedimentación lenta que evite una rápida colmatación de la cuenca.

2. Climáticos; de los cuales es importante considerar la existencia de un ambiente árido, en el que la tasa de evaporación predomine sobre la precipitación, favoreciendo así la eficiente concentración de los elementos metalogénicos.

De acuerdo al medio de formación, los depósitos de salmuera se clasifican en: origen continental, geotérmico, salmueras de campos petroleros y depósitos detríticos.

A) Salmuera Continental:

Generalmente se encuentran ubicados cerca de aparatos volcánicos, en zonas áridas con altas concentraciones salinas, se componen de arena, minerales y agua. La más común es en cuencas continentales del desierto salino (también conocidos como los lagos de sal, o salares).

En algunas ocasiones bajo condiciones climáticas adecuadas, la evaporación total de fluidos ricos en Li en cuencas cerradas genera depósitos tipo lagoon, pudiendo dar lugar a la formación de esmectitas (variedad hectorita), tal como es el caso del yacimiento Hector Valley (California USA), donde presentan concentraciones de hasta el 1% Li_2O .

B) Salmueras geotérmicas:

Las salmueras geotérmicas representan el 3 % de los recursos mundiales conocidos de litio y se componen de una solución salina, concentrada y caliente que ha circulado a través de rocas de la corteza terrestre en áreas donde el flujo de calor es extremadamente alto. La solución se enriquece progresivamente con elementos como el litio, boro y potasio. Pequeñas cantidades de litio se encuentran en las salmueras de los campos geotérmicos de Wairakei (Nueva Zelanda), Reykanes (Islandia) y El Tatio (Chile).

El Mar de Saltón en el sur de California es el ejemplo más conocido de una salmuera geotérmica que contiene litio. Simbol Materials, es una compañía privada con sede en California, que produce

carbonato de litio de alta pureza a partir de salmueras producidas por la descarga de una planta de energía geotérmica que operan en el Mar de Saltón.

C) Salmueras en campos petroleros:

Los campos petroleros son áreas con reservorios subterráneos de hidrocarburos. Al extraer petróleo y gas, también se lleva a la superficie una cantidad significativa de salmuera hipersalina que se denomina como "agua producida". Estas salmueras a menudo son ricas en metales disueltos, pudiendo, en algunos lugares, incluir litio. En los últimos años, la creciente demanda de litio ha inspirado a algunas instalaciones de campos petroleros a implementar tecnologías para recuperar litio del agua producida. Las tecnologías utilizadas para este propósito han incluido la separación por gravedad, la flotación de gases y la floculación, entre otras.

D) Depósitos en arcillas:

En los depósitos detríticos, el litio forma parte de la estructura cristalina de las arcillas, como en algunas fases minerales del grupo de la esmectita. El tipo más común de esmectita es la hectorita ($\text{NaO}_3(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$), que es una variedad rica en magnesio y litio. Recibe el nombre de un depósito en el condado de Héctor, California y que contiene 0.7 % de litio. Kings Valley, Nevada alberga otro gran depósito de hectorita con un estimado de 48.1 millones de ton de recursos indicados y 42.3 millones de ton de recursos inferidos con una ley de 0.27 por ciento de litio. El litio en las arcillas puede resultar también por el enriquecimiento secundario por efecto del movimiento ascendente de aguas termales subterráneas.

- Yacimientos de litio de origen magmático.

Los yacimientos de origen magmático ocurren generalmente en granitos, pegmatitas graníticas y mineralizaciones hidrotermales asociadas, y han constituido y constituyen aún hoy una fuente muy importante para el beneficio de Li, Rb y Cs (Gallego, 1992).

La pegmatita es una roca ígnea intrusiva de grano grueso formado a partir de la cristalización de magma en el interior de la Corteza Terrestre y que puede contener cantidades extraíbles de un número de elementos, incluyendo litio, estaño, tántalo y niobio. Las pegmatitas ricas en litio son rocas plutónicas formadas por procesos tardío magmáticos y concentraciones de granitos peraluminosos. Se hace referencia a ellas como pegmatitas de tipo LCT (litio, cesio, tántalo) debido a su enriquecimiento por estos elementos incompatibles como, además de cesio, , y rubidio. Debido a estas características, se diferencian también de las pegmatitas con elementos raros de tipo NYF (niobio, itrio, flúor) (Gallego, 1992). Las pegmatitas de tipo LCT generalmente son enriquecidas por componentes con capacidades fundentes (entre los cuales se incluye el agua, el flúor, el fósforo y el boro) que se evidencian en su composición mineralógica y geoquímica única (Trueman, 1982).

Mineralógicamente, las pegmatitas de tipo LCT son dominadas por asociaciones de cuarzo + feldespatos potásico + albita + moscovita. También, presentan estructuras zonadas con fases más avanzadas y fraccionadas, como en el caso de la espodumena (Li), la pelatita/castorita (Li), la columbita y tantalita (Ta-Nb), la casiterita (Sn), la (del) apatita(o) [P], del berilio (Be), de turmalina (B), y de los granates que se generan en las zonas internas del núcleo y bordes (Trueman,

1982). Uno de los principales yacimientos con estas características se ubica en Greenbushes, Australia (Figura 2.1).



Figura 2. 1 *Mina Greenbushes —extracción de Li-Ta-Sn en pegmatitas de tipo LCT Australia. Fuente:*

Olympus,2016.

El procedimiento para la extracción de litio de pegmatita es costoso ya que requiere un minado tradicional, lo que significa que dichos depósitos se encuentran en desventaja en comparación con los depósitos de salmuera. Sin embargo, la concentración de litio en pegmatitas es considerablemente más alto que en las salmueras, de tal manera que depósitos con valores extremadamente altos de litio pueden todavía ser económicamente viables. Alaska, el norte de Ontario, Quebec, Irlanda y Finlandia son conocidas por sus yacimientos de litio en pegmatitas.

- **2.3. Importancia económica**

Este metal es poco conocido dada su escasa abundancia en la Tierra y está siendo prospectado a escala mundial considerando el gran potencialidad para almacenar energía. En la actualidad su aplicación para fabricación de baterías de litio es quizás el uso más común e importante. Se encuentra en baterías recargables que alimentan teléfonos celulares, tabletas etc. Como compuesto, se encuentra como carbonato de litio, siendo incluso un producto farmacéutico. Dado que uno de los factores que determina el precio en el mercado de este elemento es su abundancia

y demanda (Figura 2.2), es importante considerar que solo hay un suministro limitado, ya que constituye solo el 0,0007% de la abundancia elemental en la Corteza Terrestre.

El litio es altamente reactivo, debido a esto, no se presenta como un elemento puro en la naturaleza, sino que está contenido en diversos minerales, especialmente en lepidolita, espodumena, petalita y amblygonita, así como también en rocas ígneas y salmueras. No obstante, el litio también es producido mediante la electrólisis de fusiones de cloruro.

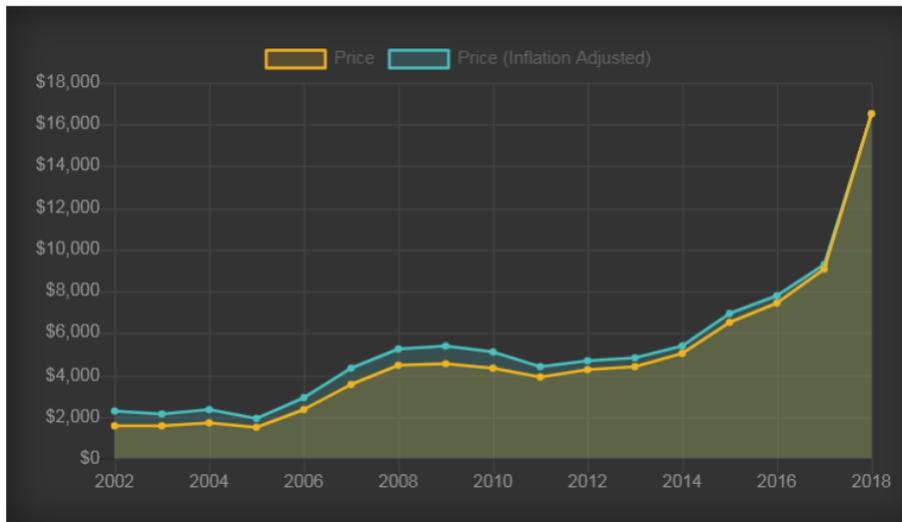


Figura 2. 2 Grafica que muestra el precio de Litio en el mercado internacional en un periodo de 15 años y mostrando un aumento significativo en los precios, (Metalary, 2020).

Según datos de Metalary.com, el valor de la tonelada del mineral en el mercado internacional se ha incrementado progresivamente desde el 2012, cuando el precio fue de 4,220 dólares por tonelada, hasta el 2016 año en el que alcanzó su mayor precio histórico (Figura 2.2), con un valor de 7,475 dólares por tonelada. En el presente año 2023, se observa que el precio en el año 2018 se incrementó llegando a 16,500 dólares por tonelada, equivalente al 46%, dándole un valor sumamente importante en el mercado (Tabla 2.3). Debido a esto, la exploración continua, los recursos de litio han aumentado sustancialmente en todo el mundo.

Tabla 2. 3 Precio por tonelada expresado en dólares de Litio en el mercado internacional. Modificado de Metalary, 2023.

Año	Precio	Precio ajustado a inflación
2018	\$16,500	\$16,500
2017	\$9,100	\$9,318
2016	\$7,475	\$7,830
2015	\$6,500	\$6,965.70
2014	\$5,050	\$5,417
2013	\$4,390	\$4,784.58
2012	\$4,220	\$4,668.29
2011	\$3,870	\$4,371.01
2010	\$4,350	\$5,070.37
2009	\$4,530	\$5,364.66
2008	\$4,440	\$5,237.05
2007	\$3,530	\$4,321.91
2006	\$2,320	\$2,919.99
2005	\$1,460	\$1,896.39
2004	\$1,720	\$2,310.06
2003	\$1,550	\$2,137.94
2002	\$1,590	\$2,243.56

● **2.4. Producción mundial de litio**

Los recursos y reservas de litio, de acuerdo con la actualización del informe correspondiente al año 2017 del USGS, tuvieron un crecimiento de 7,6% y 13,5%, respectivamente, en relación al reporte del 2016, acorde al mayor nivel de exploración e información en la minería del litio.

El 2017 las reservas alcanzaron a 15,6 millones de toneladas de litio, frente a los 14,5 millones del período anterior, crecimiento que se origina por el aumento de las cifras de Australia. En cuanto a los recursos, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) reporto mayores recursos en Argentina, Chile y Australia, siendo esta última nación la que dio cuenta del mayor avance en la evaluación de reservas, pasando de 2.000.000 a 5.000.000 de toneladas (1 tonelada de litio equivale a 5,323 toneladas de carbonato de litio).

La mayor cantidad de reservas mundiales de litio se encuentran en Chile, con el 48% del total, seguido de Australia, con el 17%, y Argentina, con el 13%. En cuanto a recursos, Bolivia (17%) y Argentina (18%) dan cuenta del 35% del total, mientras que Chile posee el 16%. Si bien existen países con abundantes recursos, no es factible económicamente explotarlos debido a que presentan altos niveles de impurezas como el magnesio (Donoso *et al.*, 2018).

En la figura 2.3 destacan los principales productores del denominado Triángulo de Litio. Se ha llamado así por su posición geográfica en América del Sur, en el límite de Argentina, Chile y Bolivia, que concentra más del 85% de las reservas mundiales. El salar de Atacama, en Chile, es uno de los productores más grandes, y otro depósito de gran importancia en este ambiente es el Salar de Uyuni, en Bolivia.

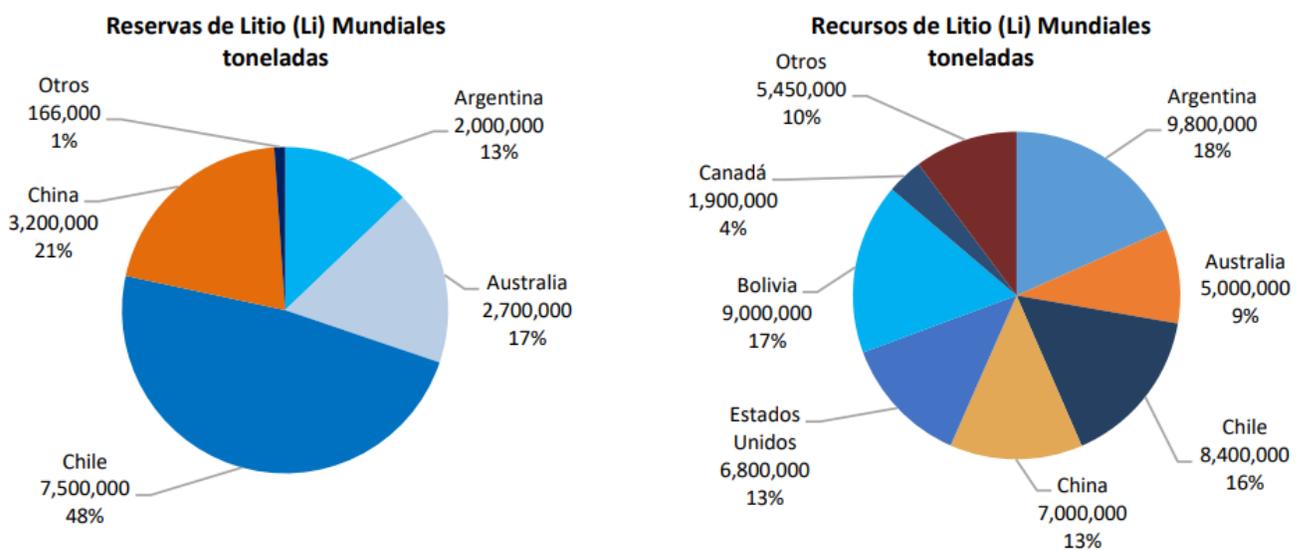


Figura 2. 3 Producción mundial de litio, tomado de Miranda, 2009.

En el caso de México, cuenta actualmente con reservas probadas de Litio en arcillas en la región de Sonora. El volumen reportado es de 3 millones 500 toneladas y ya existe un proyecto de nombre Bacanora Minerals en fase de construcción y pruebas. Esta empresa es de capital canadiense con sede en Toronto y oficinas en Hermosillo, misma que cuenta con al menos 7 yacimientos en la entidad y que, en alianza con otra firma canadiense de nombre Rare Earth Minerals, tiene previsto

arrancar con la producción de 17 mil 500 toneladas de litio en 2017 y duplicar su producción a 35 mil toneladas al año para el 2019, (Salvatierra, 2018).

En la Tabla 2.4, se puede apreciar la gran diferencia en los contenidos en litio que presentan las salmueras de los distintos lagos salinos explotados.

Tabla 2. 4 Contenido promedio de Litio explotada en salmueras. (Garcés, 2012)

Localización	%Li	%Na	%K	%Mg	%SO ₄	%Cl	%B	Li/Mg
Bolivia: Salar de Uyuni	0.025	8.8	0.72	0.65	0.046	15.7	0.02	1/19
Chile: Salar de Atacama	0.14	7.6	1.87	0.93	0.03	16	0.1	1/1.64
Israel-Jordan: Mar muerto	0.0015	3.21	0.6	3.33	1.18	17.32	0.003	1/2200
EEUU: Great Salt Lake,Utah	0.004	8	0.65	1	0.016	14	0.006	1/250
Silver peak, NV	0.023	6.2	0.53	0.033	0.2	10.06	0.008	1/1.5

- **2.5. Litio: políticas y regulación para el uso de energías limpias.**

Las secuelas adversas del cambio climático y la restrictiva condición “no renovable” de recursos convencionales están poniendo fin al reinado de los hidrocarburos. La terminación de la “Época del Petróleo”, aunque no parece cercano, derivado de la crisis petrolera que inició en el 2013, fue la gota que colmó el vaso de un mundo regido por los combustibles fósiles, obligando a buscar otras fuentes de energía que carezcan de las debilidades del otrora invencible “oro negro”, dando la pauta para la entrada de nuevos recursos energéticos.

El litio es totalmente reciclable, así que no es una materia prima no renovable (como el petróleo). Esto abre un campo más en el ciclo productivo del mineral, ya que almacena energía y es utilizado para autos eléctricos, pudiendo llegar en un futuro a reemplazar parcialmente la dependencia del petróleo.

La producción de Litio en México entrará de manera eficiente en el marco legal, ya que desde el año 2015 fue aprobada por la Cámara del Congreso de la Unión la Ley de Transición Energética, la cual establece políticas y medidas para impulsar el aprovechamiento energético de recursos renovables y para la sustitución de combustibles fósiles, así como para la reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica. Considerando que en el país no se explota en grandes dimensiones y que el litio se puede encontrar tanto en pegmatitas, salmueras, y arcillas; es importante emprender un programa de exploración para detectar nuevos yacimientos.

Con el argumento de que el mercado demanda una gran cantidad de este producto y que se encuentra en progresivo crecimiento, desde su fase de extracción si proviene de salmueras (que no necesariamente requiere minado tradicional), lo convierte en un proceso fácil y económico, llegando a satisfacer la necesidad de energías alternativas y limpias.

A la fecha Sonora cuenta con reservas probadas de litio. El proyecto en el cual la minera Bacanora Minerals, tiene previsto producir este metal por los próximos años, pretende abastecer a las empresas automovilísticas de autos eléctricos (como Tesla). De concretarse, Sonora y el país se podrá convertir en uno de los mayores productores de Litio en el mundo, mineral que solo se extrae en lugares como Chile, Argentina, Perú, Sudáfrica y Australia, con la ventaja estratégica de que se ubica a un lado del mercado con mayor demanda, fomentado por el emergente negocio de los autos eléctricos y a la demanda de baterías eléctricas.

Recientemente se han hecho nuevos descubrimientos de yacimientos de este metal, por lo que, a través de los años, se vuelve un material cada vez más indispensable y posiblemente llegue a satisfacer necesidades que solo se cubren actualmente con combustibles fósiles. Por ejemplo, la compañía canadiense Macusani Yellowcake informó que ha descubierto recursos comprobados por 2,5 millones de toneladas de litio y 124 millones de libras de uranio, solo en la zona este del

depósito Falchani, en Puno Perú. Ulises Solís, gerente general de Macusani Yellowcake, operadora del proyecto ubicado en la Meseta de Macusani, a 4.5000 msnm. Se indica que, con este hallazgo, el proyecto Macusani se encamina a convertirse en la mina de litio más grande del mundo (Sadarriaga, 2018). Solís (año) explicó que el yacimiento es de alta ley, pues un salar importante (como los que son explotados en Chile y Bolivia) posee una ley promedio de 500 partes por millón (ppm). Sin embargo, en Falchani se ha encontrado contenido de seis a siete veces superior, entre los 3.500 a 4.000 ppm.

Por su parte Bacanora Minerals cuenta con diez concesiones mineras que cubren aproximadamente 100 mil hectáreas en el noreste del estado de Sonora, México. La compañía a través de perforación y exploración ha estimado recursos de casi 9 millones de toneladas de carbonato de litio, lo que lo hace uno de los mayores depósitos de litio en el mundo. Los recursos tienen una vida de 200 años y los costos de producción se calculan de menos de 4 mil dólares por tonelada, siendo un proyecto atractivo de bajos costos productivos (Mexico Mining Center, 2018). La empresa (de origen canadiense), ha confirmado la “excelente economía” de Sonora a través de un estudio de factibilidad y aseguró un acuerdo de compra para la producción de la Etapa 1, mientras también recibe la aprobación de su declaración de impacto ambiental para la construcción de una mina a cielo abierto y una gran instalación de beneficio para el procesamiento de las menas. México Mining Center (2018), en su página de internet detalla el proyecto en curso.

- **2.6. Usos y aplicaciones**

Si bien el litio es uno de los minerales industriales más interesantes, dadas las propiedades especiales para la producción de calor y electricidad, uno de sus usos alternos es el de reducir la temperatura de fusión de materiales, con un importante ahorro de energía en la industria metalúrgica. El litio también mejora notablemente la calidad del material, obteniendo un producto más estable y resistente al calor. Estos beneficios responden a su elevado potencial electroquímico,

ya que es un elemento sólido más liviano, destacando su principal uso como material de cátodos en las baterías de ion litio, los cuales han tenido creciente demanda por su gran capacidad para almacenar energía, razón por la que lo demandan principalmente las empresas dedicadas a la fabricación de automóviles eléctricos.

En la actualidad solo dos procesos de obtención son económicamente factibles: mediante salmueras y minerales. De ambas fuentes, la primera transformación permite obtener carbonato de litio, y de la segunda se obtienen compuestos de hidróxido de litio y cloruro de litio.

El carbonato de litio (Li_2CO_3), dada su versatilidad, se utiliza en diversas industrias, como la electrónica, cerámica, y vidrio. El hidróxido de litio se utiliza principalmente en la producción de grasas lubricantes que pueden trabajar en condiciones extremas de temperatura y carga, consiguiendo que las grasas sean resistentes al agua y a la oxidación, permitiendo, además, que tengan un buen desempeño en un amplio rango de temperaturas. Aproximadamente se estima que el 70% de grasas lubricantes producidas en el mundo, contienen litio.

Recientemente el desarrollo del proceso de recuperación de litio a partir de salmueras por evaporación tuvo fuerte impacto en la industria, ya que su proceso de extracción es mucho más económico que la minería tradicional y se considera de mejor calidad.

Dentro del área de la medicina, el litio forma parte de una clase de medicamentos llamados agentes antimaniáticos, utilizándose en forma de carbonato de litio, y trabaja como un estabilizador del ánimo en las personas con trastorno bipolar, una enfermedad mental crónica que se caracteriza por alternar episodios de euforia con otros de depresión.

Una amplia variedad de derivados orgánicos e inorgánicos se producen también a partir de carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio. Estos tienen diferentes aplicaciones,

principalmente en las industrias química y farmacéutica. Con el tiempo, derivados de litio han mostrado tasas de crecimiento bastante estables.

Uno de los usos que más llaman la atención de este metal, es en la energía nuclear. Se considera como un material fundamental para el desarrollo de reactores de fusión nuclear. Estos reactores utilizan deuterio y tritio como combustibles; éste último, que es escaso en la naturaleza, se obtiene irradiando con neutrones litio 6. El litio actúa como un productor de tritio, permite además su empleo como un excelente refrigerante y medio de transporte calorífico, debido a su alta capacidad calórica, baja viscosidad, alta conductividad térmica y baja presión de vapor.

Además, también es aprovechado para la fabricación de bombas de hidrogeno, ésta bomba funciona bajo el principio de la fusión, en la que se integran isótopos de hidrogeno. Según expertos, la bomba H contiene una bomba atómica "primaria" preparada para condensar el combustible de una "secundaria", lo que proporciona átomos que pueden fusionarse. Cuando la bomba de fisión primaria implosiona, calienta y condensa el combustible de fusión y lo bombardea con neutrones. Los neutrones se combinan con el litio, para producir tritio. El tritio y deuterio son el combustible de fusión en bruto; condensados por la explosión de una bomba primaria. El tritio y deuterio se fusionan para formar helio, liberando enormes cantidades de energía. Para obtener litio, se ha utilizado más frecuentemente el hidróxido de litio.

- **CAPITULO 3. DEPOSITOS DE LITIO EN SALMUERAS**

- **3.1. Generalidades**

Las evaporitas son sedimentos químicos precipitados o cristalizados a partir de sales disueltas. A diferencia de los sedimentos terrígenos clásticos que provienen de la destrucción de una roca madre y que son transportados hasta un ambiente deposicional. Los sedimentos evaporíticos se originan por precipitación directa dentro del ambiente climáticamente propicio. Para que una sal de evaporita precipite, la pérdida de agua líquida de salmuera debe exceder el flujo de entrada y

el proceso de su concentración debe ser mayormente provocado por evaporación bajo radiación solar (Warren, 2006).

Todas las evaporitas pertenecen al grupo de las sales (o haluros) y que contienen en proporciones variables iones principales como: Na, Ca, Mg, K, Cl, SO₄ y CO₃, así como otros componentes iónicos menos comunes como B, Ba, Sr, Br, I, y Li. La composición mineral y el orden de las sales que precipitan en estos ambientes, se controlan mediante la composición iónica del agua madre (Hardie y Eugster, 1970).

Las evaporitas representan alrededor del 3% de las rocas sedimentarias terrestres y se encuentran distribuidas de forma irregular en la superficie, siendo más abundantes en determinadas épocas del tiempo geológico: Cámbrico, Silúrico, Devónico, Pérmico, Triásico, finales del Jurásico, Eoceno y Mioceno. En consecuencia, aparecen dispersas por toda la geografía terrestre consecuencia de la migración de los continentes producto de la Deriva Continental.

- **3.2. Ambientes evaporíticos**

En la actualidad los ambientes evaporíticos y sus productos son muy escasos, indicando que no precipitan con la misma importancia que en épocas pasadas observándose tan sólo algunos depósitos lacustres de extensión limitada y naturaleza muy variable (ej.: lagos de África, Gran Lago salado de Uthan). En consecuencia, los ambientes actuales de depósito no sirven de modelo conceptual, pero si empírico, para explicar las grandes cuencas evaporíticas del pasado (Alonso, 2003).

Según Euster y Hardie (1979) los elementos predominantes que controlan la formación de un salar son (Figura 3.1):

1. Evaporación superior a la tasa de precipitación pluvial (lluvia)
2. Infiltraciones reducidas
3. Ambiente de cuenca cerrada (endorreica)

1.a. Tasa de Evaporación superior a la de precipitación:

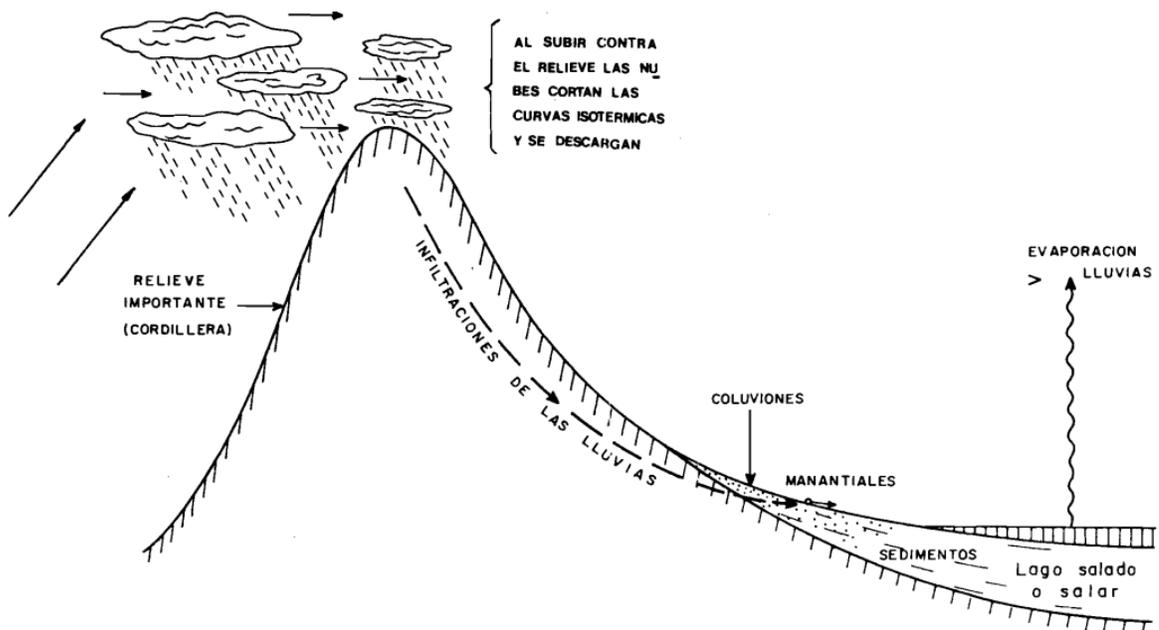


Figura 3. 1 Representación esquemática del control morfoclimático para la formación de salares (Euster y Hardie 1979; Ballivian, 1981).

Al evaporarse el agua, aumenta relativamente la concentración de las sales en el lugar. El clima y la tectónica son dos factores adicionales que controlan la intensidad de evaporación en relación con las lluvias.

1.b. Clima:

Las principales zonas climáticas en las que la evaporación es superior a las lluvias son las zonas subtropicales (i.e.: cercano a líneas terrestres ecuatoriales).

1.c. Tectónica:

Altos relieves pueden proteger ciertos terrenos de las lluvias que caen, y almacenar aguas en las sierras, para después redistribuirlas por medio del ciclo hidrológico a cuencas áridas bajas con fuerte evaporación.

2. Infiltraciones reducidas:

La colmatación de una cuenca es una etapa importante en la formación de un salar. Los sedimentos finos detríticos acarreados por las aguas fluviales hacia una cuenca cerrada, poco a poco rellenan de esa depresión desde el fondo y reducen progresivamente las infiltraciones de aguas y sales disueltas, es cuando la concentración de aguas aumenta con la colmatación. Por ejemplo, el salar de Uyuni, en el principio de su historia lacustre era un lago de agua dulce; su colmatación progresiva ha hecho que las concentraciones de varios lagos aumentaran su salinidad. (Vildary, 1978).

3. Cuenclas cerradas

El origen de las cuencas cerradas puede ser diverso, citando, entre los más comunes:

- Tectónica: zonas de Rift y Graben, como el caso de la Cuenca Altiplánica.
- Acción del viento: por deflación, proceso por el cual el viento arrastra, levanta o dispersa partículas fragmentos de rocas meteorizadas del suelo, tales como los limos (partículas de entre dos y veinte micrómetros), así como arenas y arcillas de tamaño adecuado para ser transportados por el viento. Un ejemplo de cuenca cerrada por deflación serían los pequeños salares como el Sur-Lipez, Bolivia.
- Acción de los glaciares, durante épocas gélidas de la Tierra.
- Actividad volcánica: Los flujos de lava pueden cerrar pequeñas cuencas entre volcanes.

Mineralógicamente, los salares están compuestos esencialmente por halita (NaCl), anhidrita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y yeso (CaSO_4). Entre el grupo de los sulfatos, la especie más común es el yeso, aunque la anhidrita se hace más abundante en condiciones más profundas, superiores a los 600 metros (Tabla 3.1). Se asume que este cambio se debe al proceso de deshidratación del yeso. Existen otros minerales evaporíticos mucho menos frecuentes, conocidos como sales amargas, que son los últimos en cristalizar a partir de las salmueras. Los más importantes, de acuerdo su tendencia a presentarse en ambiente marino o continental, son los siguientes (Alonso, 2003):

a) En ambiente marinos: los sulfatos (SO_4^-) como polihalita (K, Ca, Mg) y kieserita (Mg), la kainita (K, Mg), y los cloruros, como: silvita (K), carnalita (K, Mg) y bischofita (Mg).

b) En ambiente continental: los sulfatos mirabilita y thenardita (Na), glauberita (Ca, Na), epsomita y hexahidrita (Mg), bloedita (Mg, Na), langbeinita (Mg, K) y los carbonatos (CO_3^-) gaylussita (Ca, Na), trona y natron (Na).

Tabla 3. 1 Minerales en ambientes evaporíticos (Alonso, 2003).

Minerales Evaporíticos más comunes		
Cloruros	Halita	NaCl
	Silvita	KCl
	Carnalita	$\text{CaMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Sulfatos	Anhidrita	CaSO_4
	Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Polihalita	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Carbonatos		$\text{Na}_3(\text{CO}_3)$
	Trona	$(\text{HCO}_3) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$
	Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Boratos	Boráx	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
Nitratos	Soda	NaNO_3

En el aspecto climático los parámetros de temperatura y humedad relativa son los factores más importantes en su formación y, dada la influencia en la tasa de evaporación, es también fundamental el régimen de precipitaciones pluviales locales. La evaporación supera a la

precipitación cuando el viento y la insolación son elevadas y la humedad baja, es decir un balance hídrico negativo. Las zonas cálidas con viento seco son las más favorables, como son los cinturones subtropicales (30° N y 30° S) donde hay descenso de aire seco, generando las regiones áridas del planeta.

- **3.3. Formación de depósitos evaporíticos de litio**

En los ambientes sedimentarios el litio tiende a disolverse tanto en aguas continentales como en marinas, si bien su concentración puede ser elevada en salmueras que lixivian este elemento de rocas con altos contenidos naturales de Li (como riolitas, o granitos).

Es importante destacar que, debido a su gran potencial de ionización, el Li no forma sales naturales, por lo que permanece en solución aun después de la precipitación de sales minerales comunes de Na y K. Sin embargo, la evaporación total de este tipo de fluidos puede dar lugar a su incorporación en las redes de minerales del grupo de las esmectitas (hectorita) y otros minerales cuya concentración es de interés económico, (Rosler y Lange, 1972).

Los depósitos litíferos en ambientes evaporíticos son acumulaciones naturales de agua subterránea salina que están enriquecidas en litio disuelto. Generalmente, como lo indica el USGS, el litio se presenta en cuencas cerradas, tectónicamente activas, en donde el clima puede favorecer su formación, en un clima árido. También está asociado a la actividad geotérmica, por el alto flujo de calor debido y asociado al ascenso de aguas termales, y a la posible alteración hidrotermal de la roca, produciendo hectorita (Figura 3.2).

Todos los depósitos de salmuera de litio están ubicados en áreas áridas y tectónicamente activas, típicamente en cinturones de subducción o colisión con sistemas de sutura con fallas profundas (Warren, 2017). En esencia, el litio se libera por intemperismo o se deriva de fluidos hidrotermales de una variedad de fuentes de roca dentro de una cuenca cerrada. El nivel de contenido de litio depende de la composición de las salmueras y varía de acuerdo a la presencia de otros elementos,

como boro, bromo, calcio, carbonatos, cloruros, nitratos, potasio y sodio. Esto hace que el tratamiento de cada salmuera sea específico de acuerdo con su composición, siendo necesario realizar estudios geoquímicos precisos. En el salar se presentan costos bajos de producción y minerales más puros, además las condiciones climáticas de las salmueras, al encontrarse en desiertos o lugares áridos, contribuye a la evaporación natural, aminorando substancialmente los costos de producción.

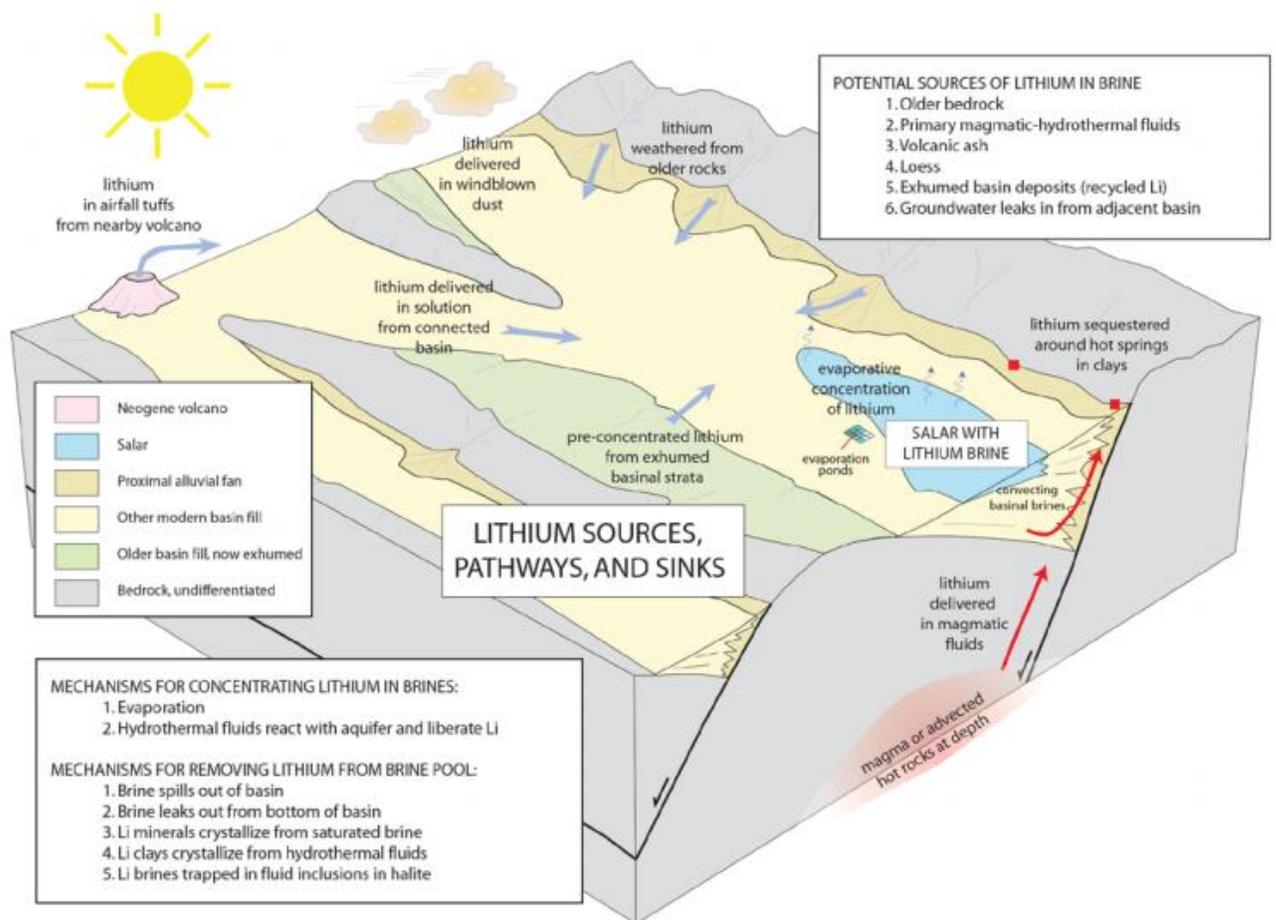


Figura 3. 2 Esquema que muestra las principales características geológicas para la formación de salmueras de litio. Tomado de Bradley, 2013.

Las cuencas que contienen salmueras con litio tienen distintos orígenes tectónicos, como en zonas de extensión. Un ejemplo es la gran reserva de Clayton Valley, Nevada (USA), que contiene 0.2 millones de toneladas métricas de Li. Este yacimiento se encuentra dentro de la Provincia extensional de Cuencas y Sierras (Basin and Range) del suroeste de los Estados Unidos. La zona mineralizada está alojada en un sistema de graben extensional, entre un complejo metamórfico antiguo y su zona de separación, (Oldow, 2009). Los grandes depósitos de Clayton Valley sugieren que las tobas vítreas félsicas son una fuente primaria particularmente favorable (Price *et al.*, 2000). Otra particularidad en Clayton Valley es el lecho de un lago del Neógeno, levantado de una etapa anterior de la evolución tectónica de la cuenca y que previamente había sido alterada hidrotermalmente a hectorita (Kunasz, 1974).

3.3.1. Minerales de litio asociados a salmueras

El litio se encuentra presente en una amplia gama de minerales (se reportan aproximadamente 145 especies mineralógicas), aunque sólo algunas poseen valor económico (Warren, 2017). Se presentan generalmente como silicatos y fosfatos y están acompañados de ciertos elementos como el aluminio, potasio y hierro, como:

- Espodumena ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$)
- Ambligonita ($\text{LiAl}(\text{PO}_4)\text{F}$)
- Lepidolita ($\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$ to $\text{K}(\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{1.5})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$)
- Petalita ($\text{LiAl}(\text{Si}_4\text{O}_{10})$).
- Holmquistite ($\text{Li}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)

En salmueras naturales, la mayoría de las sales de litio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución hasta que las concentraciones de litio se aproximan y exceden las 6000 ppm. El litio puede ser absorbido por arcillas salinas de playa en concentraciones más bajas, como en los lechos de hectorita en Clayton Playa, Nevada o hidrotermalmente de aguas salinas

hipersalinas como nódulos de jadarita, formados en el Valle de Jadar, Serbia. Los precipitados de carbonato de litio son altamente solubles y, por lo tanto, muy raros en las cuencas sedimentarias (Warren, 2017). Como se representa en la figura 3.3, existen cuatro regiones principales favorables para la acumulación de litio relacionadas con salmueras hipersalinas (Warren, 2017):

1. Altiplano andino
2. Meseta Tibetana
3. Cuenca Qaidam
4. Salmueras de Playa en la Cuenca y Cordillera del suroeste de los Estados Unidos.

En orden de importancia decreciente están representados los volúmenes de litio, asociados con arcillas lacustres cerca de Hector, California y en el Valle de Jadar, Serbia (Figura 3.3.). Se sabe que las salmueras basales (campos petroleros) contienen niveles elevados de litio en la Formación Smackover, EE. UU., y en la región de Fox Creek, Canadá (Warren, 2017).

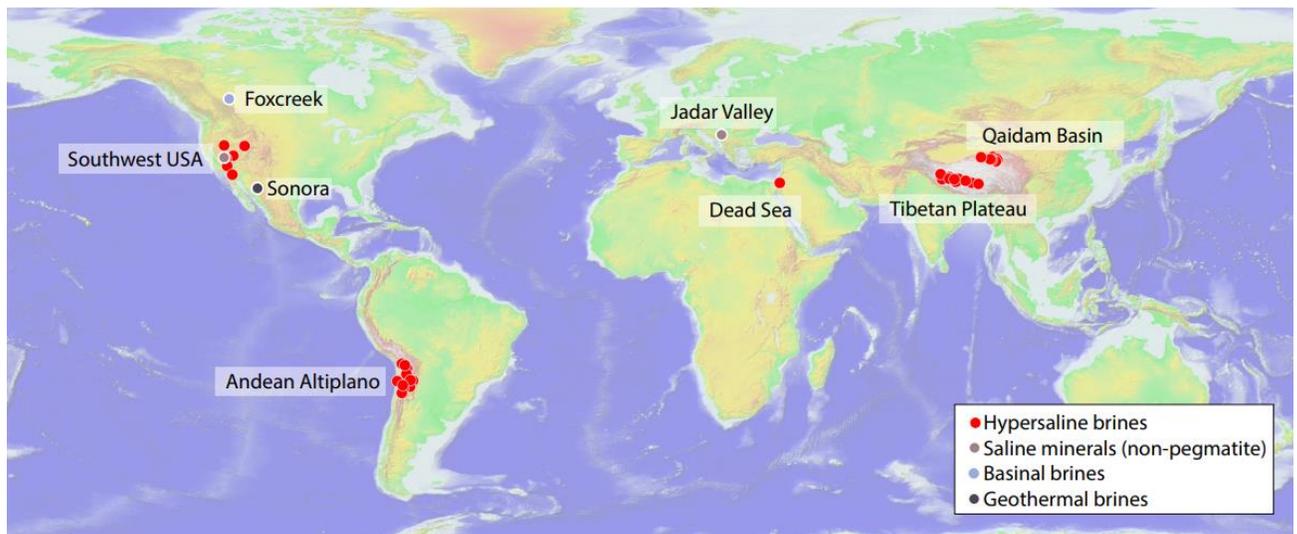


Figura 3. 3 Acumulaciones de litio en depósitos salinos de diferentes orígenes (extraído de la base de datos

SaltWorks® versión 1.7) (Warren, 2017).

En el caso particular de los depósitos salinos se encuentran dos minerales asociados con alto contenido de litio, la hectorita y jadarita:

- **Hectorita** [$\text{Na}_{0.33}(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$].

La hectorita (Figura 3.4) es un mineral arcilloso del grupo de la esmectita, donde el reemplazo de aluminio por litio y magnesio es esencialmente completo, tiene un contenido de litio > 1%, dureza 1-2 en la escala de Mohs y una densidad de 2-3 Kg/m³. Como lo menciona Asher-Bolinder (1991), la hectorita es el resultado combinado de tres distintos procesos geológicos (Figura 34):

- 1. Alteración de la ceniza o vidrio volcánico
- 2. Precipitación de fases autigénicas de aguas lacustres salinas
- 3. La incorporación de litio en los depósitos de arcilla del grupo de la esmectita



Figura 3. 4 Hectorita (Hectorita blanca, policristalina, de grano fino, obtenido de Hector, San Bernardino Co., California, USA). (Mindat.org).

Para formar hectorita, los tres procesos requieren un ambiente árido y se asocian con aguas alcalinas salinas enriquecidas con litio, rocas volcánicas y aguas termales que pueden co-precipitar también travertinos y sílice amorfa (Zientek y Orris, 2005). La misma asociación de procesos explica las arcillas de hectorita ricas en litio en King Valley (Nevada Lithium prospects) Nevada

(Figura 3.5), donde las capas de hectorita aparecen en una secuencia de rocas sedimentarias a lo largo del lado occidental de la caldera McDermitt (Kesler *et al.*, 2012).

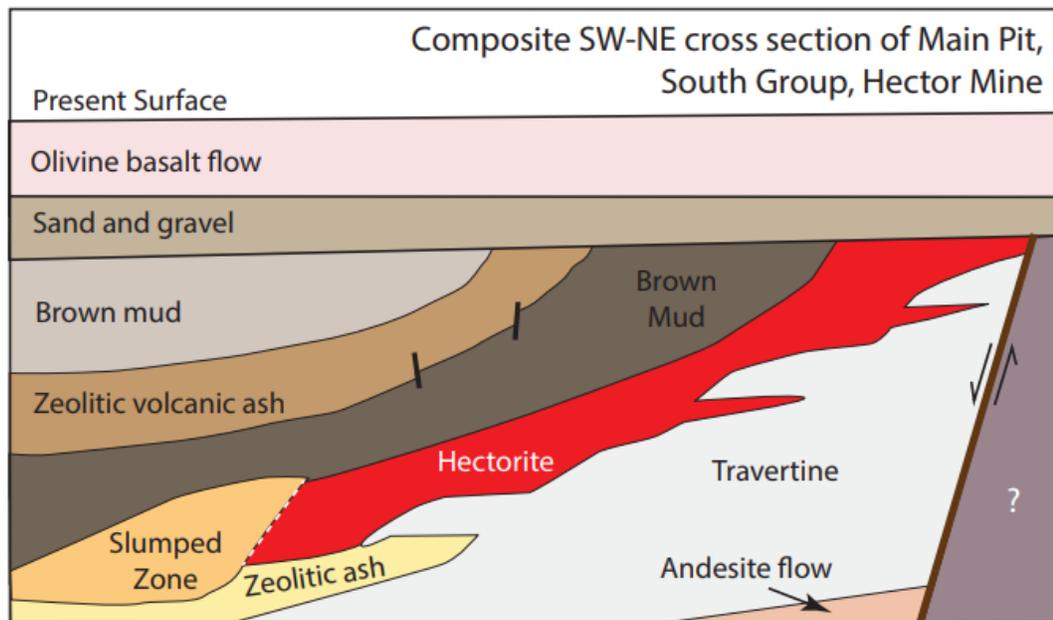


Figura 3. 5 Perfil geológico de SW-NE de la Mina de Héctor, donde se observa el emplazamiento de Hectorita, formado por alteración de ceniza volcánica y circulación de fluidos hidrotermales hipersalinos.

(Warren, 2017).

Al igual que en la mina Hector en California, la hectorita es el principal mineral de arcilla que contiene litio en una secuencia de cenizas volcánicas alteradas (Figura 3.5). Estas secuencias de ceniza están interconectadas con sedimentos salinos lacustres y travertinos, se alojan en las fosas sedimentarias adyacentes a una zona de falla de 8 km de longitud. La hectorita, formada a través de la alteración de la ceniza volcánica, ocurre en regiones donde los fluidos hidrotermales moderadamente salinos se desplazaron hacia la zona de falla (Warren, 2017). Las arcillas de hectorita también se encuentran reportadas con valor económico en el proyecto mexicano de litio, 11 km al sur de Bacadehuachi, estado de Sonora, en el noroeste de México. La hectorita probablemente se asocie con las corrientes cruzadas de aguas hidrotermales de salinidad moderada, mientras que la jadarita requiere un baño de aguas hidrotermales hipersalinas para formarse. Hasta la fecha, aún no se ha desarrollado una tecnología económicamente viable para

extraer litio de hectorita en salmueras que alojan algunos de estos depósitos de arcilla (Evans, 2014).

- **Jadarita ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$)**

La jadarita es un reconocido mineral con una concentración promedio de 5.7% de Li y un 14.7% B. Es un borosilicato de textura de porcelana blanca (Figura 3.6) con una dureza Mohs de 4-5. Se asocia con las sales de borato como la colemanita ($\text{Ca}[\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3] \cdot \text{H}_2\text{O}$) en los sedimentos lacustres del Oligoceno-Plioceno en el área tipo, Valle de Jadar, Serbia (Stanley, 2007).



Figura 3. 6 Jadarita, muestra obtenida del valle de Jadar, Serbia (Fuente Mindat.org).

La jadarita se presenta tanto en forma masiva, con varios metros de espesor, como también pequeños nódulos dentro de una matriz de carbonato de grano fino (Stanley, 2007). En el depósito principal de Jadar, una capa que contiene colemanita nodular ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}5\text{H}_2\text{O}$) se superpone a tres capas o lentes separadas que contienen jadarita $\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7(\text{OH})$. La jadarita probablemente se formó a través de una interacción facilitada hidrotérmicamente entre la salmuera salina y el sedimento clástico / evaporítico, ya sea en un huésped tufáceo o arcilloso (Kesler *et al.*, 2012).

- **3.4. Procesos de beneficio (metalurgia del Litio)**

El litio se encuentra presente tanto en pegmatitas, salmueras, campos geotérmicos, arcillas e incluso en los océanos. En la actualidad solo 2 procesos de beneficio han demostrado ser económicamente factibles: mediante salmueras y pegmatitas (Figura 3.7).

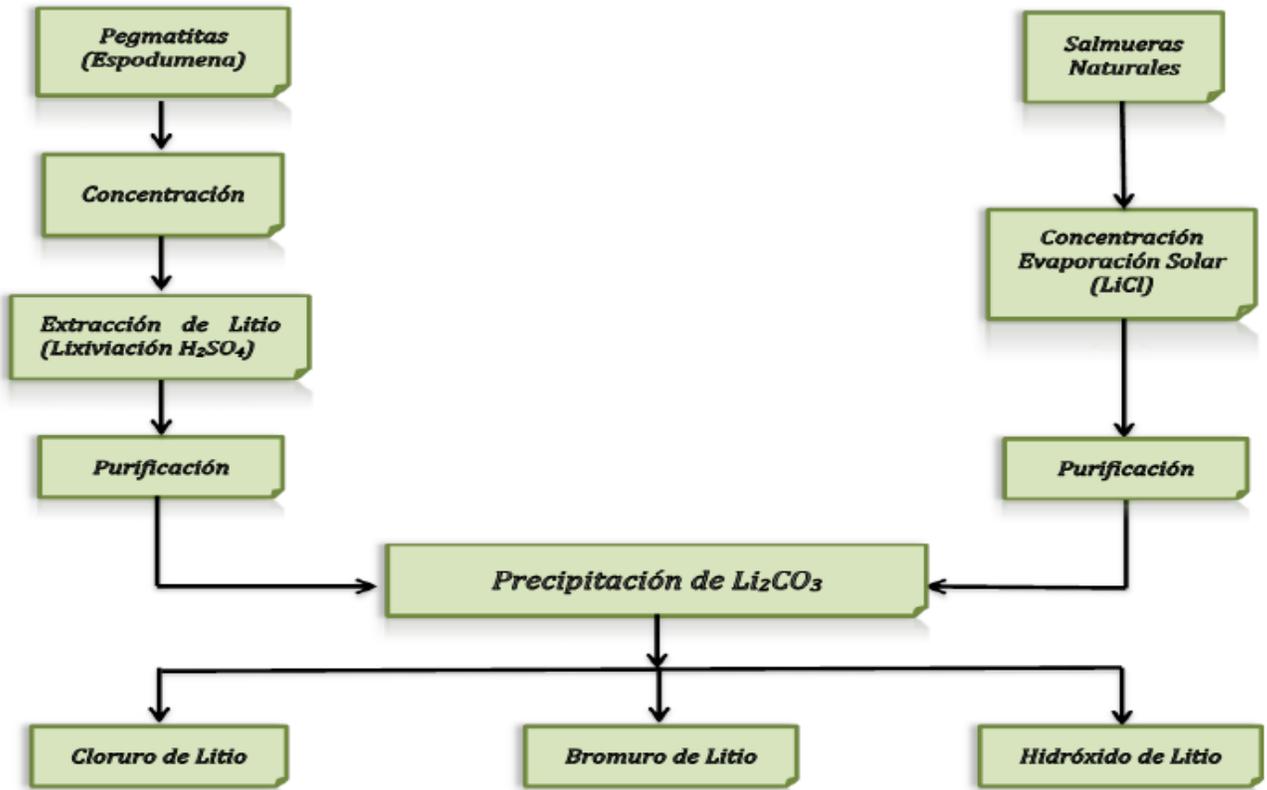


Figura 3. 7. Obtención de litio y sus procesos de beneficio mediante Pegmatitas y Salmueras (Dirección General de Desarrollo Minero Litio,2017).

Beneficio de litio mediante pegmatitas:

La espodumena fue la fuente principal de obtención de carbonato de litio hasta que se inició la explotación del litio contenido en salmueras. Para su producción, el concentrado del mismo debe ser previamente calcinado con caliza, posteriormente se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2% de litio, lo que equivale a 85 a 95% de espodumena, siendo el producto final hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio (Dirección General de Desarrollo Minero Litio,2021).

Beneficio de litio mediante salmueras

El desarrollo del proceso de recuperación del litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria extractiva al constituir este proceso una fuente de beneficio del litio con costos mucho más bajos en comparación a la obtención de litio a partir de los minerales pegmatíticos (Figura 3.8).

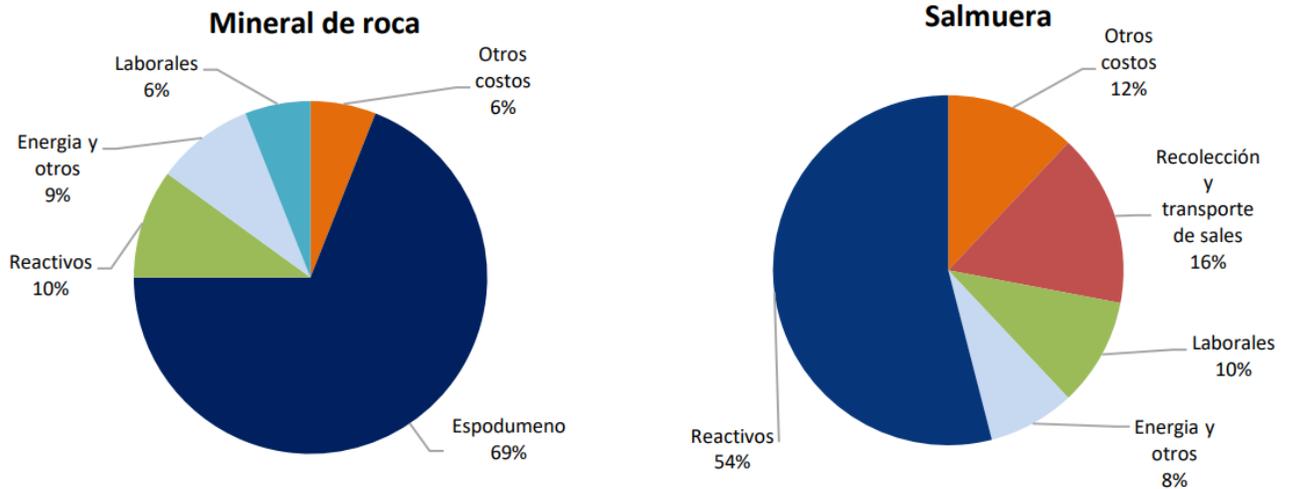


Figura 3. 8 Comparativa de costos de obtención de minería tradicional mediante extracción de Li en pegmatitas y extracción de Li en salmueras (Miranda,2009).

La composición de las salmueras en los niveles de contenidos de litio varía considerablemente, al igual que la presencia de otros elementos. Debido a esto se requiere que cada salmuera sea tratada en forma particular, de acuerdo a su composición. En este contexto se enuncia de manera general las etapas que se tienen dentro de este proceso (SGM, 2014).

La salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables, en los cuáles, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, entre otras, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato (SGM, 2014). Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio, con una pureza cercana al

99,5%. Aunque el mercado exige un mínimo de 99,1%, éste que puede comercializarse en cristales o se compacta para ser vendido en forma de gránulos.

- **CAPÍTULO 4. GEOLOGIA DE BAJA CALIFORNIA, NW DE MEXICO**

- **4.1. Geología de la zona de estudio**

Esta cuenca tiene unos 20 km de ancho y se extiende al NNE unos 100 km, hasta el extremo suroeste del Valle Imperial, California. La zona se encuentra limitada al oeste por la Sierra Juárez, que forma parte del Batolito de las Cordilleras Peninsulares y al oriente por la Sierra de Cucapá (Gastil *et al.*, 1975), (Figura 4.1).

A nivel regional el área corresponde a una profunda cuenca de gran extensión y origen tectónico que esta rellena de sedimentos continentales y marinos Cenozoicos. La secuencia detrítica sobryace a un basamento constituido por rocas graníticas. El límite morfológico oriental de la cuenca es la Sierra Cucapá, que está compuesta por rocas ígneas intrusivas (Dumas, 2008). La única estructura volcánica aflorante de edad más reciente es el Volcán de Cerro Prieto, que consta de dos centros eruptivos superpuestos y es el origen de las secuencias andesíticas y riodacíticas aledañas (Vázquez, 1996). Es esta actividad magmática reciente la que se ha propuesto que constituye la fuente de calor para el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Lira, 2005).

Las rocas pre-Cenozoicas en la región de la Sierra Cucapá son esencialmente rocas metamórficas pre-batolíticas del Paleozoico y rocas batolíticas e intrusivos del Cretácico, que forman los rasgos más abruptos al oeste de la sierra (Barnard, 1968; Siem, 1992), (Figura 4.1).

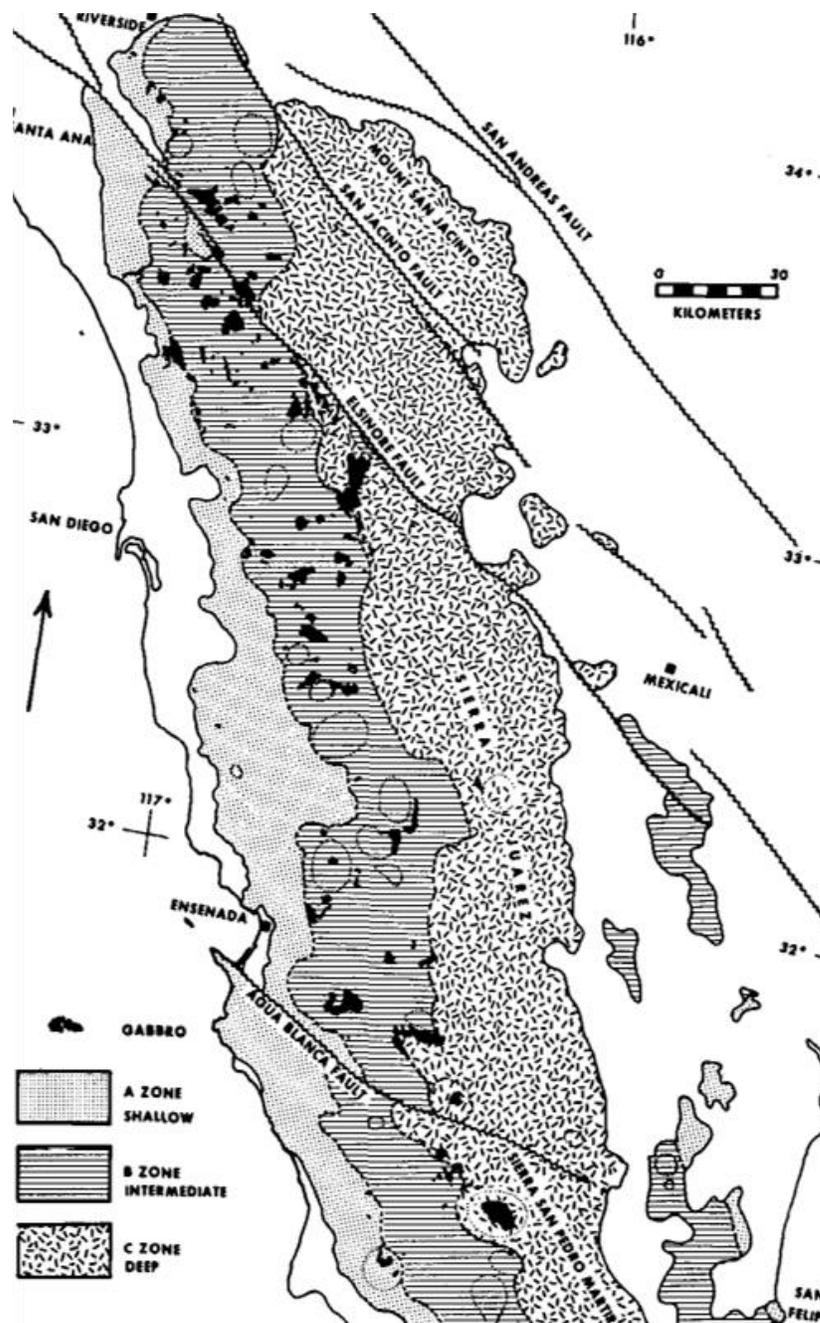


Figura 4.1 Mapa de Gastil et al. (1975), mostrando rocas plutónicas al sur de California y norte de Baja California. Zona A, poco profunda con rocas metamórficas y plutónicas. Zona B, intermedia. Zona C, zona profunda.

Rocas del Basamento

En la Sierra Cucapá afloran rocas metasedimentarias en facies de sillimanita del Pérmico-Jurásico, probablemente producto de metamorfismo regional de alta temperatura y relativa baja presión; las

litologías más comunes son: gneis cuarzo-feldespático de hornblenda-biotita, gneis de sillimanita-almandino y calizas recristalizadas (Figura 4.2). Menos abundante es la anfibolita y raramente cuarcita (Barnard, 1968).

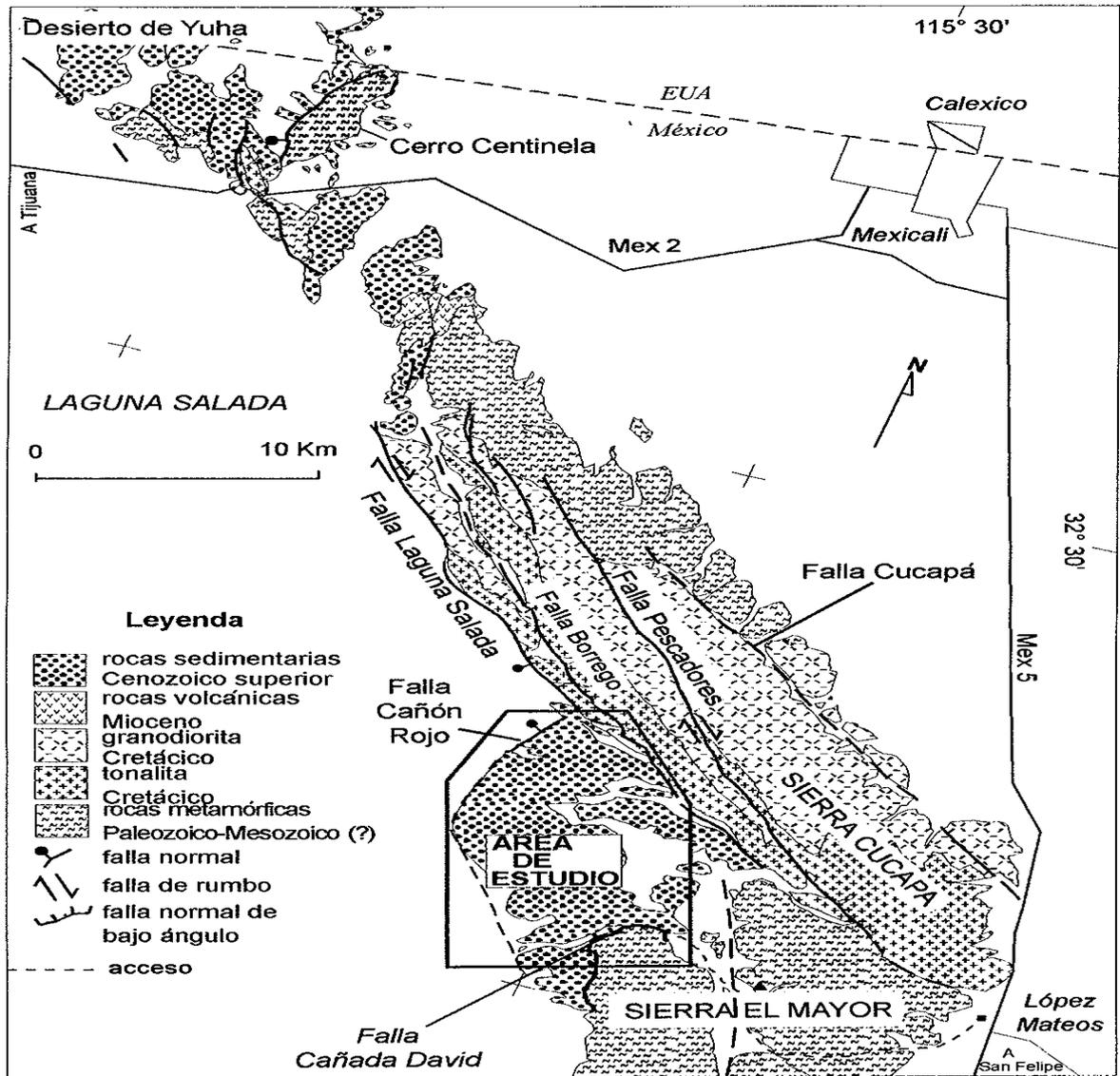


Figura 4.2 Mapa geológico regional. Tomado de Barnard (1968).

En la porción centro-sur de la Sierra Cucapá está expuesto un intrusivo de tonalita (Tonalita La Puerta). La edad determinada por Barnard (1968) con plomo-alfa fue de 125-155 Ma; la edad del mismo intrusivo, obtenida por Gastil *et al.*, (1975) utilizando el método de K-Ar fue de 62.6 ± 1.5

Ma. En la porción central una granodiorita (Granodiorita Cucapá) intrusión al cuerpo de tonalita, implicando una edad posterior de emplazamiento batolítico (Barnard, 1968).

En la Sierra El Mayor, al sur del área de estudio, afloran rocas metasedimentarias del Paleozoico, producto de un metamorfismo de alto grado (facies de anfibolita), principalmente gneis de granate, anfibolita, cuarcita y mármol (Siem, 1992). En esta misma sierra también incluye la presencia de cuerpos intrusivos de tonalita a monzo-granito en forma de diques, mantos y troncos (Siem, 1992).

Rocas Volcánicas Neógenas

Las rocas volcánicas que afloran en la Sierra Cucapá son diques y derrames de andesita afanítica de color verde parduzco, probablemente emplazados en el Neógeno (Barnard, 1968). Estas lavas cortan y sobreyacen a las rocas del basamento. Se han reportado auto-brechas y aglomerados de dacita porfídica de plagioclasas a dacita porfídica de hornblenda. Una edad de K-Ar de 15.3 ± 0.8 Ma fue publicada por Barnard (1968). En la Sierra El Mayor existen diques de andesita afanítica verde a gris con fenocristales de hornblenda, probablemente similares a los de la Sierra Cucapá (Siem, 1992).

Depósitos Cuaternarios

Existen depósitos cuaternarios de aluvión en las laderas de la Sierra Cucapá, nombrados como conglomerado gris con las características de no estar consolidado y con matriz arenosa. Las capas horizontales del conglomerado reciente sobreyacen en discordancia angular a las diferentes unidades anteriores y su espesor aumentan considerablemente hacia el SW.

4.1.1 El Cinturón Batolítico del oriente de Baja California

Dante Morán (1985) define tres cinturones pre-Terciarios orientadas al NW-SE, están cubiertos de manera independiente por cuerpos volcánicos y depósitos sedimentarios pertenecientes al

Terciario y Cuaternario, además presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas diferenciables, (Figura 4.3).



Figura 4. 3 Cinturones batolíticos de Baja California. Tomado de Morán (1985)

El primer cinturón constituye el extremo occidental de la península y está representado por una secuencia del Cretácico superior consistente de sedimentos marinos y continentales que se representan poco consolidados y sin fuertes perturbaciones tectónicas. La secuencia fue denominada por Beal (1948) como Formación Rosario, y consiste de estratos subhorizontales de arenisca, limolita, lutita y conglomerado con presencia, tanto de fósiles marinos como de huesos de saurios, lo cual atestigua el desarrollo de ambientes que

variaron desde continentales hasta de plataforma, y talud con líneas de costa fluctuantes (Morán, 1985).

El segundo cinturón, ubicado al este de la península, lo constituyen secuencias de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, cuya edad corresponde principalmente al Cretácico inferior. La secuencia superior y más extendida fue denominada por Santillán y Barrera (1930) como Formación Alisitos. Esta formación está constituida por rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como por rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. Esta secuencia se encuentra deformada y parcialmente metamorfizada (Morán, 1985).

Rangin (1978) ha interpretado esta secuencia como uno de los cinturones volcánico-sedimentarios que se desarrollaron en la parte noroccidental de la República Mexicana durante el Mesozoico, (Morán, 1985).

El tercer cinturón localizado al borde oriental de la península constituido de rocas plutónicas y metamórficas. A este cinturón pertenecen los batolitos Mesozoicos de la porción norte de Baja California (Morán, 1985).

- **4.2. Apertura del Golfo de California**

La apertura del Golfo de California y la extensión oceánica subsecuente han sido el resultado de una reorganización local del movimiento de las placas tectónicas, se encuentra sobre un borde divergente complejo, es decir, donde las placas del Pacífico y Norteamérica se separan, y debido a esto nuevo material asciende desde el manto, formando nueva corteza. Su evolución involucra los tres tipos de procesos tectónicos: rift, subducción y sistemas transformantes, iniciando a partir de los procesos de subducción de la Placa de Farallón por debajo de la Placa de Norteamérica.

Actualmente existen dos teorías, las cuales se retoman en este capítulo para explicar la apertura del Golfo:

1. Stock y Hodges (1989):

Estos autores sugieren que la evolución de este rift se dio a través de una deformación particionada, la cual inicio después del cese de la subducción hace 12.3 Ma; una componente de extensión ortogonal se focalizo en donde actualmente se encuentra la Provincia Extensional del Golfo y dio lugar a la formación del proto-Golfo, y una componente transtensional de la deformación, dada por el sistema de fallas lateral derecho Tosco-Abreojos, (Figura 4.4).

2. Fletcher *et al.*, (2007):

Postulan que la apertura se dio desde una transtensión generalizada con un menor desplazamiento lateral derecho fuera de Baja California, la cual se desarrolló desde hace 12.3 Ma.

En cualquier caso, los dos modelos consideran que la extensión que dio origen a este rift en el noroccidente de México inicio a los 12.3 Ma, cuando finalizó la subducción de la Placa de Farallón. Durante el Oligoceno, la Placa de Farallón estaba subduciendo bajo la Placa Norteamericana (Atwater, 1970). Un cambio tectónico de régimen de subducción a extensión, con base al tipo de deformación que derivó en la apertura del golfo, ocurrió durante el Mioceno medio (12.5 Ma).

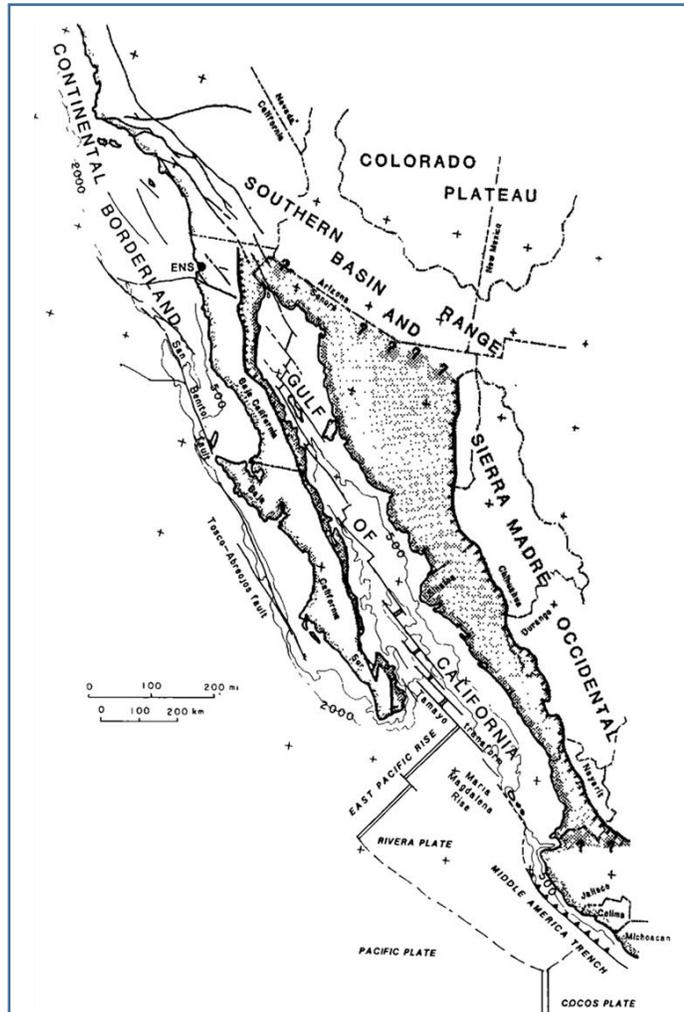


Figura 4. 4 Mapa de Baja California y sur de Norteamérica, mostrando el sureste de la provincia Basin and Range, y la provincia extensional del Golfo. Tomado de Stock y Hodges (1989).

Este cambio se completó durante el Mioceno a través del sistema de fallas Tosco-Abrejos (Angelier *et al.*, 1981). A fines del Mioceno, la Península de Baja California ya era una microplaca, y su movimiento con respecto a la Placa Norteamericana se llevó a cabo a través de los sistemas de fallas normales de la provincia extensional del Golfo de California (Fletcher *et al.*, 2007). Desde hace 6 Ma, la Dorsal del Pacífico Oriental (EPR, por sus siglas en inglés) se propagó hacia el norte, formando varios centros extensionales conectados por fallas transformantes, que se extienden hasta el Sistema de Fallas de San Andrés (Lonsdale, 1989). Figura 4.5. Los centros activos de expansión en el Golfo de California coinciden con

las depresiones más profundas de las cuencas oceánicas, similares a grabens tectónicos (Einsele, 1985).

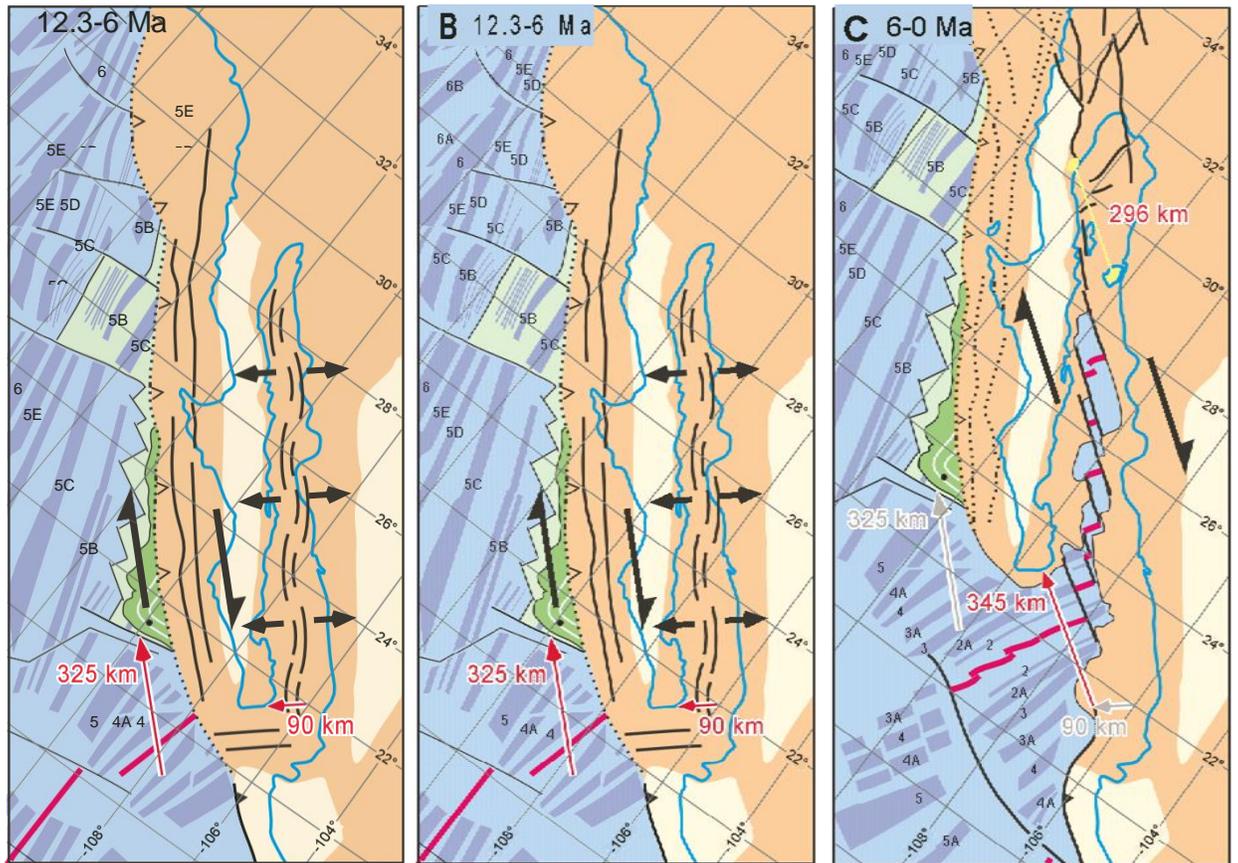


Figura 4.5 Modelos propuestos para la apertura del Golfo de California, tomado de Fletcher et al. (2007).

Éste fue el proceso que originó la posterior formación de un mar lineal y estrecho, consecuencia de la subsecuente expansión del fondo oceánico en un pasado geológico reciente, en el Plioceno, aproximadamente hace cuatro millones de años, y que hoy conocemos como Golfo de California.

Por otro lado, el desprendimiento de este inmenso bloque cortical dejó su huella en la porción continental (siendo más evidente en la zona del límite costero de Nayarit y Jalisco), formándose un borde transformante que generó un centro de expansión activo en el Golfo de California y que está representado por el Sistema de Fallas de San Andrés. Esta nueva estructura geológica de

escala continental está conectada desde Cabo San Lucas hasta Cabo Mendocino, comprendiendo la totalidad de la península e incluyendo la porción suroeste de Baja California Sur.

4.2.1. Tectónica del Golfo

La evolución tectónica de Baja California durante el Paleozoico parece haber estado relacionada a la margen continental cordillerana del borde occidental de Norteamérica (Gastil *et al.*, 1981). Los escasos afloramientos expuestos de estas litologías antiguas en el oriente de Baja California Norte, además de las secuencias calcáreas y detríticas de Sonora, revelan la presencia durante esta era de un dominio de margen pasiva para el noroeste de México.

La colisión del arco intraoceánico de la Formación Alisitos contra la margen del cratón, ocurrió aparentemente en distintos episodios debido a la presencia de fallas de transformación entre trincheras que desplazaban los distintos segmentos de arco (Durán. 2016). El episodio principal de colisión parece haber ocurrido en Baja California durante el Cenomaniano, este fenómeno generó una primera fase de deformación que plegó, metamorfizó y levantó las secuencias volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, al tiempo que continuaban los principales emplazamientos batolíticos (Gastil *et al.*, 1981).

- **4.3. Marco Geodinámico de Baja California**

Proceso tectónico tipo RIFT (apertura cortical):

Se le denomina rifting al proceso de ruptura de una placa tectónica (continental u oceánica) implicando procesos de extensión litosférica. Este proceso involucra la formación inicial de cuencas extensionales que son limitadas por sistemas de fallas normales y que son el reflejo de un adelgazamiento cortical (Sengör y Burke, 1978; Sengör, 1995; Olsen y Morgan, 1995). Los sistemas de rifts continentales se pueden clasificar de distintas formas, de acuerdo a sus características reológicas, genéticas y cinemáticas (Rosenbaum *et al.*, 2008).

A) La clasificación reológica considera el tipo de la litósfera involucrada en la extensión; en ésta se consideran tres tipos principales:

1) Rift estrecho: en el cual la extensión se da a lo largo de una franja angosta, tanto en la corteza como en el manto litosférico, y debido a que ambos desarrollan resistencia a la ruptura. Presenta un fallamiento normal muy marcado y se caracteriza por un aumento en el espesor de la litósfera en los bordes del rift (Figura 4.6a) (Durán, 2016).

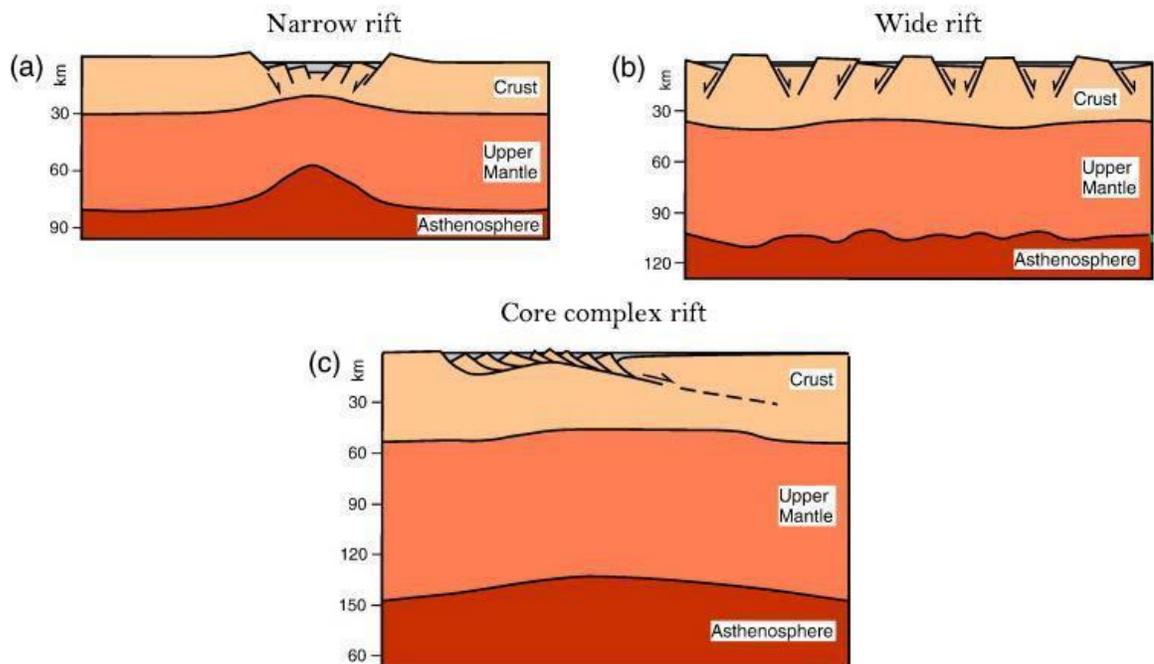


Figura 4. 6 Esquemas representando las tres formas de extensión de litosférica con base a su reología.
Tomado de Durán,2016.

A2) Rift ancho: se caracteriza por un adelgazamiento difuso en una zona amplia y debido a la baja resistencia tanto de la corteza como del manto litosférico. Presenta una gran zona de extensión que no se distribuye homogéneamente en la zona de apertura (Figura 4.6b).

A3) Rift del tipo core complex: éstos se asocian a colapsos post-orogénicos de una litósfera previamente engrosada. Aquí la corteza inferior fluye mientras que la extensión se focaliza en la

corteza superior frágil, llegando a exponer parte de la corteza inferior (Buck, 1991; Benes y Davy, 1996; Corti *et al.*, 2003) (Figura 4.6c).

B) La clasificación genética considera la fuente de los esfuerzos extensionales (Sengör y Burke, 1978). Se tienen dos modelos: el rift pasivo y el rift activo.

B1) En el modelo del rift activo los esfuerzos extensionales están dados por el ascenso de material astenosferico el cual debilita la litosfera y la adelgaza, es decir el manto astenosferico juega un papel de ente activo (Allen y Allen, 1990) (Figura 4.7a).

B2) En el modelo de rift pasivo los esfuerzos están aplicados en los límites de placas. Aquí, la extensión es causada por la migración de las trincheras que produce adelgazamiento, ascenso de la astenosfera y finalmente ruptura (Figura 4.7b). En este caso el manto astenosferico asciende de manera pasiva.

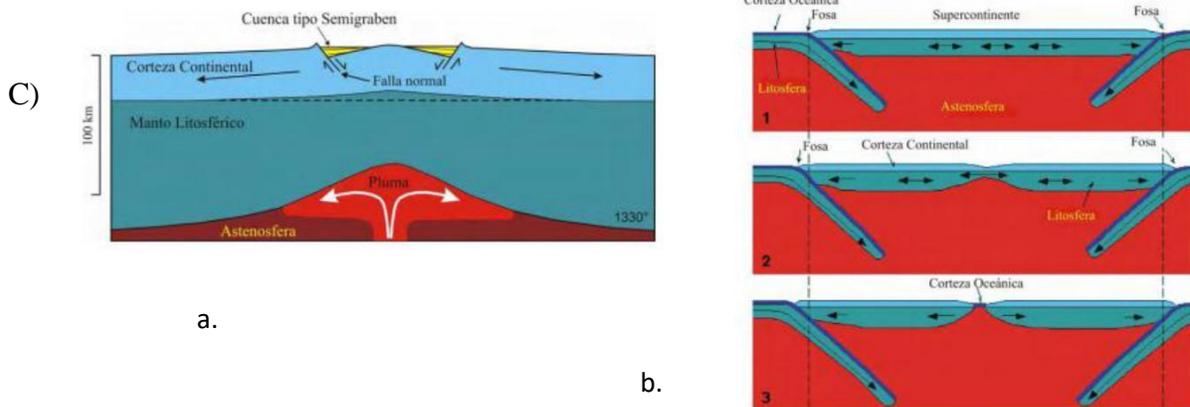


Figura 4. 7 Modelos de rifts de acuerdo con la fuente de los esfuerzos extensionales. a) Rift activo. Modificado de Bott (1992); b). Rift pasivo. Modificado de Schliische (2005). Tomado de Durán, 2016.

Proceso Cinemático tipo tectónica de Subducción:

Es un proceso tectónico por colisión de placas. Debido a que se tienen placas con direcciones relativas de movimiento opuestas, la más densa se hunde debajo de la menos densa a lo largo de lo que se conoce como zona de subducción o trinchera. La placa que subduce, la más densa, se va hacia el interior del manto, calentándose y fundiéndose parcialmente, generando magma que asciende a la superficie a lo largo de zonas de fallas profundas. Una zona de subducción se caracteriza por deformación, vulcanismo, formación de montañas, metamorfismo, actividad sísmica y depósitos minerales importantes, (Figura 4.8).

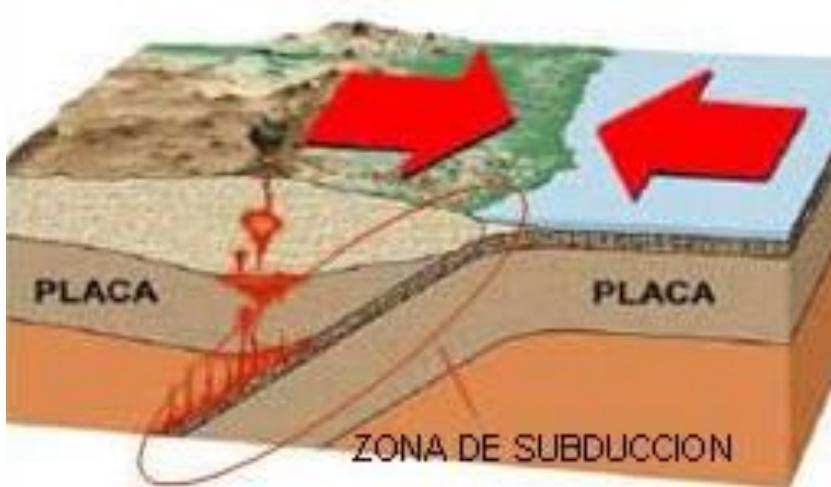


Figura 4.8 Proceso de subducción, donde la placa más densa es la que subduce, fundiéndose en el manto y generando magmatismo activo (plutónico y extrusivo) a lo largo de la zona de subducción. (SGM, 2019).

- **4.4. Geología estructural**

Las fallas en Baja California, son evidencias geológicas de la gran actividad tectónica a la que fue, y sigue estando sometida. La Península de Baja California forma parte de la Placa Pacífico, la cual se desplaza hacia el NW con respecto a la Placa Norteamericana. Según Contreras-Pérez *et al.*, (2012) en la parte norte del estado, el deslizamiento de estas dos placas se manifiesta en una zona de cizalla definida por Legg *et al.* (1991) y conocida como la Zona de Cizalla del Sur de California (Southern California Shear Zone).

La distribución de los sedimentos en el Valle de Mexicali y Valle Imperial se ha visto afectada desde hace aproximadamente cuatro millones de años por el movimiento hacia el NW de la Península de Baja California y a lo largo del Sistema de Fallas San Andrés. Se ha estimado una velocidad de desplazamiento de 36 mm al año a lo largo de la Falla San Andrés que, junto con el desplazamiento hacia el norte de la península por las fallas Imperial, Elsinore, Laguna Salada y Cerro Prieto, sugiere un orden de desplazamiento lateral de rumbo N-NW del orden de 300 km de la península respecto al continente. En la desembocadura del Río Colorado el efecto de este movimiento durante el Plio-Cuaternario (Lira, 2005) es el alargamiento de las cuencas de Salton y de Cerro Prieto, hasta convertirlas en cuencas elongadas con dirección NW y de tipo pull apart.

La Sierra Cucapá se encuentra dominada por un fracturamiento compensatorio muy importante con rumbo NW-SE conjugado con desplazamientos alternativos de ambos. Las fallas regionales que afectan la continuidad de la sierra son las fallas Cucapá, Borrego y Pescadores, de edad post-Miocénica (Figura 4.9). Durante el evento distensivo del Mioceno, la Falla Laguna Salada tuvo un comportamiento lístrico que evolucionó a dextral normal, que es el desplazamiento actual de las otras fallas mencionadas.

Las principales fallas de la zona estudiada se encuentran en el margen oriental de la Cuenca de Laguna Salada. La Falla Laguna Salada, dextral y de orientación NW, es una de las fallas más activas en el área y registra actividad histórica (Mueller y Rockwell, 1991).

El Sistema de Rifts del Norte del Golfo de California (SRNGC) tiene ~300 km de longitud y está formado por un arreglo de fallas transtensionales distribuidas sobre una zona de ~150 km de anchura. El sistema de fallas forma parte del límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica y se conecta hacia el sur con los rifts oceánicos del este del Pacífico a través de las fallas transformes de Guaymas, Carmen, Atl, Pescadero y Tamayo (Contreras-Pérez *et al.*, 2012) Cruz-

Castillo (2002), hace una breve descripción de las principales fallas activas regionales (Figura 4.5). El autor afirma que fueron originadas gracias a la gran actividad tectónica que empezó en el periodo del Plioceno y Cuaternario en el norte de la Península.



Figura 4.9 Principales fallas regionales al norte de Baja California. Rosales et.al., 2012.

4.4.1 Sistema de Fallas Transformantes Regionales activas

Las principales estructuras del Sistema de Fallas Transformantes Regionales activas son (Figura 4.10):

- Falla San Miguel: Estructura de desplazamiento lateral derecho y rumbo N 60° W. Es una falla escalonada que forma pendientes bajas, desplaza el drenaje y abanicos aluviales, genera manantiales y en ella se definen líneas de vegetación. El inicio de su actividad se sitúa en el Mioceno medio y su velocidad actual es de 0.1-3 mm/año. Se asocia a varios

Sistema de Fallas San Clemente-San Isidro:

La zona de fallas San Clemente-San Isidro tiene más de 300 km de largo. Se encuentra localizada en la parte poniente del interior del borde continental y abarca la zona de cizalla delineada por las estructuras de San Clemente y San Isidro y por fallas laterales subparalelas del rumbo N 40° W (Cruz-Castillo, 2002). La falla San Clemente es lateral derecha y a ella se asocian vetas hidrotermales, cañones y abanicos submarinos. Se desconoce su velocidad de desplazamiento (Legg, 1991; Cruz-Castillo, 2002). La falla San Isidro también es de desplazamiento lateral derecho y ha sido delimitada por escarpes hasta de 350 m de altura. Ha presentado enjambres de temblores con magnitudes cercanas a 5 y en un área localizada a unos pocos kilómetros al NW del poblado de San Quintin (Rebolleae *et al.*, 1982; Cruz-Castillo, 2002).

Sistema de Fallas Imperial-Cerro Prieto

- **Falla Imperial:** Forma parte de un límite de placas, se encuentra delimitada sobre el lado oriental del centro de dispersión Cerro Prieto. Es la principal conexión entre la Falla de San Andrés y las estructuras del Golfo de California. Su velocidad de desplazamiento se ha estimado en 47 mm/año (Cruz-Castillo, 2002).
- **Falla Cerro Prieto:** Falla de tipo dextral y se extiende a lo largo de 80 km desde el centro de Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner. Es la estructura que marca la frontera entre las placas de Norteamérica y Pacífico, en la región del Valle de Mexicali, su desplazamiento es mayor a 50 mm/año. Está asociada a temblores de 1852, 1875 y 1891, con una magnitud de 6-7, el de 1934 con magnitud de 7.1, el del El Golfo de 1966 con una magnitud de 6.3 (Lesage y Frez, 1990; Frez y González, 1991; Suarez, 1999).
- **Sistema de Fallas Laguna Salada:** Este sistema se encuentra dentro de la provincia de Basin and Range, y es el límite estructural entre la Laguna Salada y la Sierra Cucapá. La Laguna

Salada es el resultado de la subsidencia provocada por la falla durante el Plioceno y Holoceno en la margen occidental de la Sierra Cucapá. Se trata de dos fallas juntas, una compleja en su parte sur y otra simple en su parte norte. Al SE se compone por la Falla Cañón Rojo y Chupamirtos, al oriente por las fallas Cucapá, Pescaderos y Borrego.

La mayoría de las fallas descritas son de tipo dextral y presentan velocidades de desplazamiento desde 1 mm hasta 60 mm por año. Todas se han movido durante el Cenozoico tardío y están genéticamente relacionadas con el régimen de esfuerzo tectónico actual (Cruz-Castillo, 2002).

4.4.2. Lagunas tectónicas tipo Sierras y Cuencas (Basin and Range)

Posterior a la orogenia Laramide, esto en gran parte de la Cordillera y Sonora, se produjo un evento extensional llamado fase orogénica Basin and Range.

A este proceso distensivo se le atribuye la exhumación de diferentes niveles estructurales de la corteza media a superior. En el noroeste de Sonora y el suroeste de Arizona, se formaron cabalgaduras con desarrollo de rocas miloníticas, que fueron exhumadas debido a la tasa de extensión más importante. (Thierry, 2011).

Esta fase extensional está caracterizada por un fallamiento normal de alto ángulo con orientación general N-S a NNW-SSE, que limitan los flancos de las sierras de varios kilómetros con tasas de extensión relativamente bajas (Henry y Aranda-Gómez, 1992). Algunos autores han propuesto la existencia de fallas con desplazamiento a rumbo dentro de la provincia, que corresponden a zonas de transferencia paralelas a la dirección de la extensión, éstas dividen la provincia extensional en varios dominios.

CAPITULO 5. METODOLOGÍA ANALÍTICA

Se muestrearon arenas y afloramientos acorde a los objetivos de la tesis de trabajo, potencial existencia de enriquecimientos de litio en las secuencias evaporíticas y calidad de arena silíceo en las márgenes de sierras. Posterior a la recolección de las muestras, se hizo un cuarteo de las arenas cercanas a Tulecheck y Laguna Salada en Baja California.

Las muestras para analizar se obtuvieron de las siguientes zonas (Figuras 5.1): Zona 1 Laguna Salada asociada a depósitos evaporíticos y, Zona 2 Sierra Cucapá con altas concentraciones de material detrítico silíceo

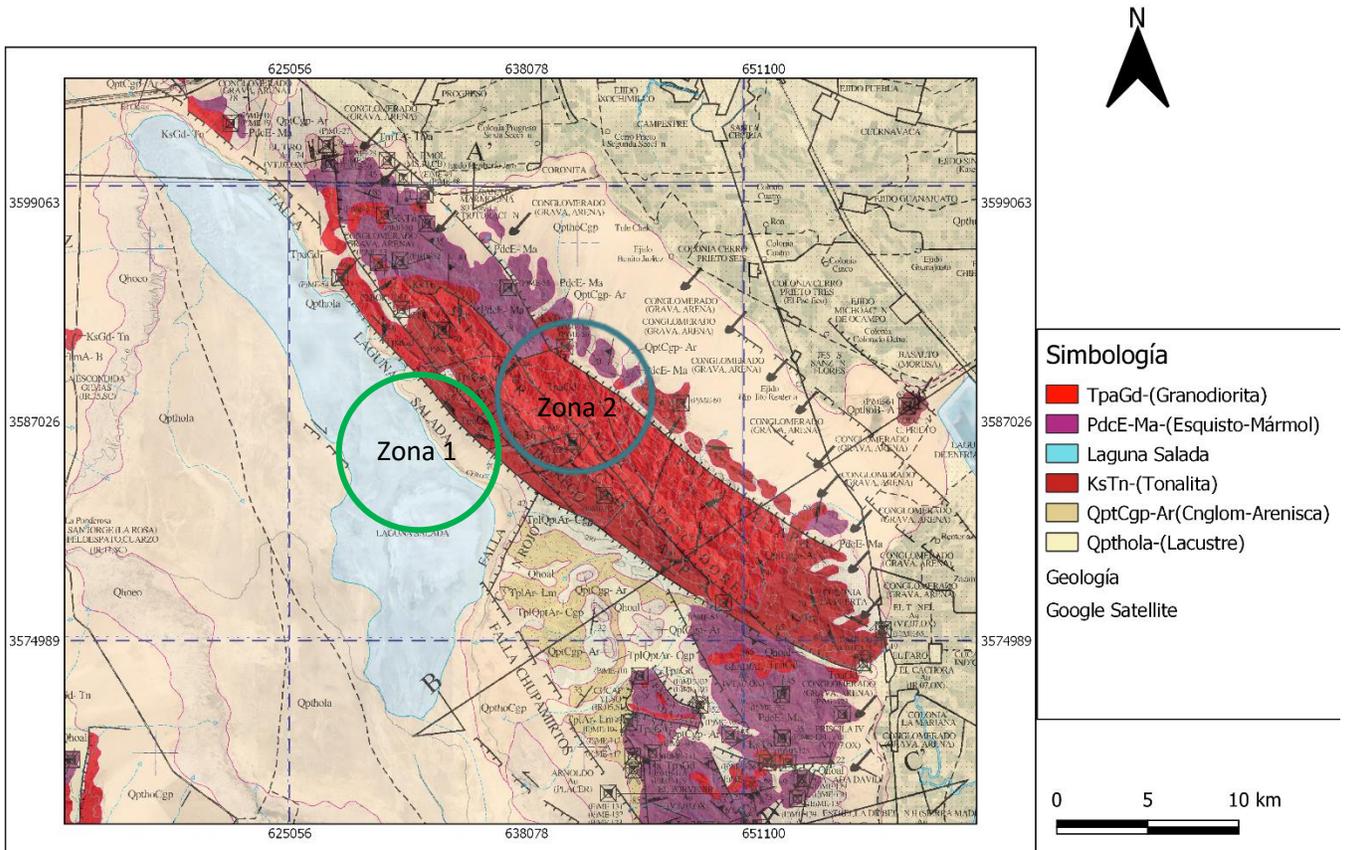


Figura 5. 212 Localización de las muestras del caso de estudio, modificado del mapa geológico-minero carta Mexicali 111-12 escala 1:250 000. Se omiten coordenadas por confidencialidad

Procedimiento del tamizado.

El proceso de tamizado de las arenas cuarzo feldespáticas se realizó en el Laboratorio de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El análisis se lleva a cabo asegurándose que los tamices se encuentren limpios, en este caso se limpiaron todas las mallas con una compresora con aire, para no dejar ningún sedimento en la malla, y así evitar cualquier posible contaminación cruzada por el proceso de preparación de la muestra.

Los tamices se acomodan en el Rot-tap formando una columna en orden, el tamiz número #8 queda en la parte superior y el tamiz #325 en la parte inferior.

El tamizado se realizó conforme al sugerido por Folk (1980). Utilizando los tamices de: N° 8 (2.38 mm), N° 10 (1.68 mm), N° 12 (1.41 mm), N° 14 (1.19 mm), N° 16 (1 mm), N° 20 (0.850 mm), N° 60 (0.250 mm), N° 100 (0.150 mm), N° 140 (0.106 mm), N° 200 (0.075 mm), N° 325 (0.045 mm).

Las muestras se trabajaron en seco, se pesaron y se procedió a vaciarlas en el juego de tamices, una vez colocadas, se ajustó la rot-tap y se programaron 10 minutos para su tamizado (Figura 5.2 a).

Ya que se cerró el ciclo del Rot-tap, se extrae toda la columna de tamices y se lleva a una mesa, con cuidado, se saca el primer tamiz (No. 8), se vacía la muestra en una superficie limpia y se verifica que se retire por completo para evitar pérdida de material.

Posteriormente se coloca en un vidrio de reloj, y se registra el peso en la báscula (Figura 5.2 b), de la muestra previamente tratada, anotando el peso en una hoja de registro. El sedimento se vacía

en una bolsa, donde se anota el nombre de la muestra y el número de malla en el que estuvo retenida.

Para el análisis estadístico, se convierten los diámetros de las partículas expresados en milímetros(mm) a unidades ϕ (phi). La escala ϕ se define como el negativo del logaritmo base 2 del tamaño de grano en milímetros acorde a la ecuación:

$\phi = -\log_2 N$ donde N es el tamaño de grano en milímetros.

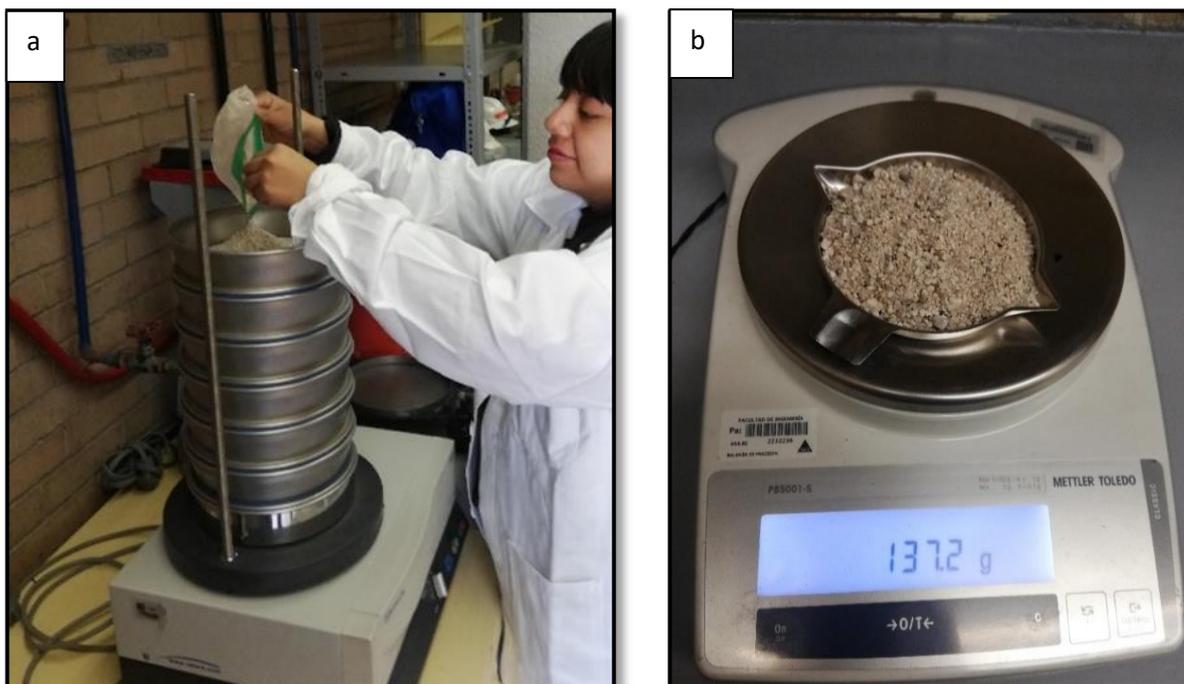


Figura 5.213 **a.** Se programó el juego de tamices sobre la rot-tap con un tiempo de 10 minutos. **b.** Se registró el peso de cada fracción retenida en cada malla

Los datos obtenidos de cada muestra son registrados en las tablas del Anexo 2.

Cálculo de Parámetros Estadísticos

Con la finalidad de facilitar la obtención de estos parámetros, se organizó la información de las muestras en una tabla de Excel, calculando el porcentaje en peso y el porcentaje acumulado.

Posterior al análisis granulométrico, se utilizó el microscopio estereoscópico modelo Carl Zeiss (Figura 5.3), del laboratorio de Separación de arcillas del Instituto de Geología de la UNAM, con

la finalidad de separar el cuarzo de las plagioclasas, para su posterior estudio por Fluorescencia de Rayos X, y utilizando la fracción N° 20 equivalente a 0.850 mm.

Las arenas cuarzo-feldespáticas son analizadas con un aumento de 40x (Figura 5.4), en donde se separa el cuarzo, depositándolo en una caja de petri, recolectando 12 gramos para cada muestra.

Este procedimiento se sigue para todas las muestras.



Figura 5. 537. Utilización del microscopio estereoscópico modelo Carl Zeiss, para la separación de cuarzo.

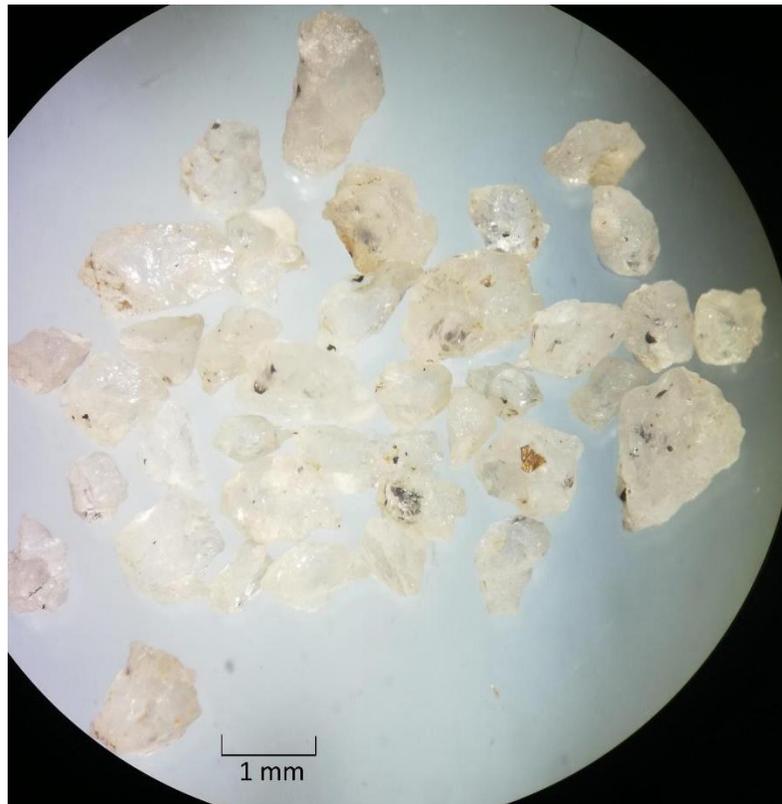


Figura 5. 456 Selección de cuarzo, vista desde el estereoscopio con objetivo 40x.

Una vez recolectados los 12 gramos de cuarzo necesarios para análisis de calidad, se procede a pulverizarlas en el taller de molienda, ubicado en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica del Instituto de Geofísica, LUGIS, UNAM. (Figura 5.5).



Figura 5. 780 Trituración de muestras de cuarzo, arenas, arcillas y evaporitas en la pulverizadora del Instituto de Geofísica UNAM. Muestra pulverizada de evaporita LS-A-1.

Todo este proceso se realizó con el objetivo de obtener muestras pulverizadas para su posterior análisis geoquímico, utilizando las técnicas de Fluorescencia de Rayos X.

- **5.1.1. Análisis Granulométrico**

Existe una gran variedad de técnicas que incluyen histogramas y gráficos de probabilidad que permiten analizar la distribución del tamaño de grano de una población de sedimentos. Para determinar la distribución de tamaños de una población como ésta es utilizado el análisis o prueba de tamices, que se lleva a cabo cerniendo los agregados a través de una serie de tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

Uno de los elementos importantes a considerar para el análisis granulométrico es conocer las escalas granulométricas, las cuales son consideradas como subdivisiones arbitrarias de una sucesión continua de tamaños de grano. Estas subdivisiones se realizan para estandarizar la terminología sedimentológica y para simplificar los análisis estadísticos de los sedimentos.

La escala Udden-Wentworth (Tabla 5.1), una escala granulométrica para clasificar los diámetros de los sedimentos, donde las partículas de más de 64 mm de diámetro se clasifican como cantos rodados. Las partículas más pequeñas corresponden a guijarros, gránulos, arena y limo. Las de menos de 0,0039 mm corresponden a arcilla.

Tabla 5. 1 Escala granulométrica modificada de Udden-Wentworth (1957).

Escala ϕ (phi)	mm	Clase de tamaño Wentworth	Clasificación de la partícula
-8	256	Bloque	Gravas
-7	128	Canto	
-6	64		
-5	32		
-4	16	Guijarro	
-3	8		
-2	4		
-1	2	Granulo	
0	1	Arena muy gruesa	Arenas
1	0.5	Arena gruesa	
2	0.25	Arena media	
3	0.125	Arena fina	
4	0.062	Arena muy fina	

Para que la escala granulométrica sea útil en estadística, debe ser una escala regular, cuyos términos mantengan una relación simple entre sí. Una relación lineal primaria sería inapropiada, ya que si, por ejemplo, tomáramos el milímetro como unidad, la arcilla, el limo y casi toda la arena deberían colocarse en una clase y solo la arena gruesa y la grava serían subdivisibles.

En cambio, una escala geométrica es la más apropiada, pues da origen a unidades más pequeñas para las partículas menores, y más grandes para las mayores. Al graficar, se hace sobre una escala logarítmica, pues de esta manera todos los intervalos geométricos quedan igualmente espaciados. (Miranda, 2014).

Representación gráfica en histogramas.

Es una representación gráfica de la distribución de frecuencia, se grafica mediante barras verticales cuya área es proporcional a la cantidad de material de cada clase. Si el ancho de cada intervalo es igual, la altura de las barras es proporcional a la cantidad de material de cada clase. Permite una visualización rápida de las características generales del sedimento, pudiendo observarse su distribución modal, la asimetría y diferencias cualitativas de la curtosis.

El histograma se representa en un sistema de coordenadas cartesianas, en papel milimétrico. En las abscisas se grafican las clases granulométricas en escala phi (ϕ) Udden-Wentworth (Figura 5.6) y en ordenadas la frecuencia en porcentaje (%). (Miranda, 2014).

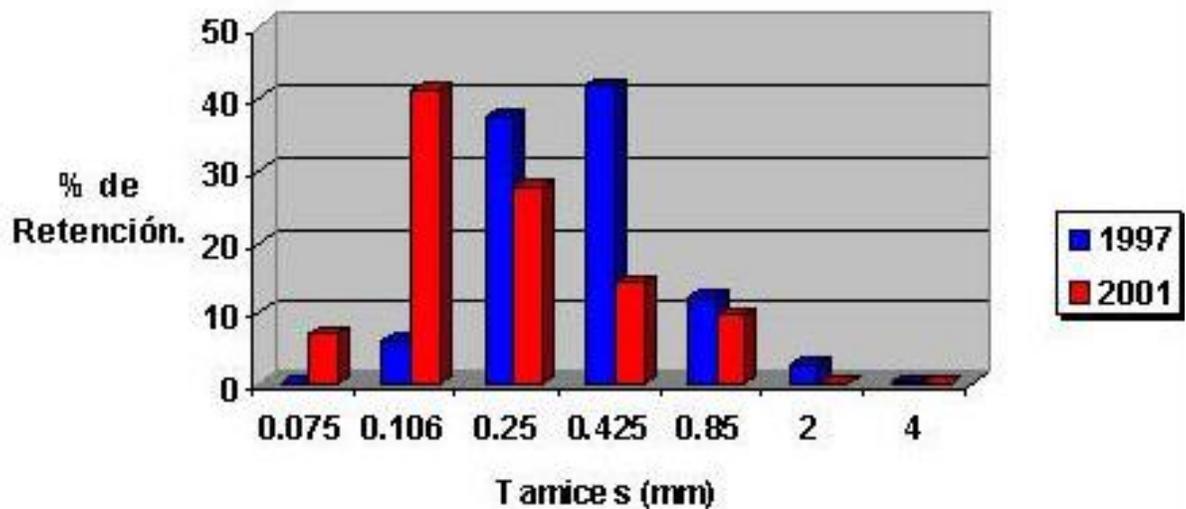


Figura 5. 781 Histograma representando la distribución granulométrica de los sedimentos, separados por tamiz. (Ridel, 2015).

Curva acumulativa o de frecuencia acumulativa

Es una representación gráfica de la frecuencia granulométrica, cuya construcción puede realizarse a partir de los datos analíticos. Su trazo en papel milimétrico tiene forma de "S" abierta mientras que en papel de probabilidad es una línea recta (si la distribución es logarítmica normal) o casi recta.

Para el cálculo de los parámetros estadísticos, por los métodos gráficos, conviene hacerlo en un programa estadístico. Sí se quiere llevar a cabo la representación en forma manual, se deberá utilizar papel de probabilidad que es simétrico con respecto al 50% de la frecuencia y cuyos intervalos se van agrandando hacia ambos extremos, sin llegar nunca al 100% o hasta el 0%, pues esos valores quedarían en el infinito. De esta manera, la curva se "estira" logrando representar los extremos de la misma (colas) con mayor definición, otorgándole mayor confiabilidad a los valores extraídos de estos sectores. Para su construcción, se representan los datos en un sistema de ejes cartesianos. (Miranda, 2014).

Parámetros granulométricos.

La media y la mediana: son las medidas de la tendencia central reflejan la energía cinética media del agente de transporte. Este aspecto tiene influencia por parámetros como velocidad del agente de transporte, forma, gravedad específica, composición y resistencia de los sedimentos durante el transporte.

La desviación estándar es una medida de dispersión más útil para clasificar arenas de acuerdo a sus diferentes ambientes de depósito; participan parámetros tales como la velocidad del agente de transporte, el grado de turbulencia, propiedades hidrodinámicas, naturaleza de los sedimentos provistos al ambiente de depósito y el índice de materiales detríticos (Mckinney y Friedman, 1970).

Nos muestra el grado de clasificación granulométrica, la clasificación es más baja cuantos mayores intervalos de grados estén involucrados en la distribución granulométrica, refleja el tipo de agente de transporte y es una medida de su grado de fluidez o viscosidad.

Los coeficientes estadísticos utilizados por Folk y Ward (1957) serán útiles para el análisis granulométrico de las muestras de la zona de estudio, además son utilizadas para obtener diferentes parámetros tales como mediana, media, desviación estándar, asimetría y curtosis. (Figura 5.7 y Tabla 5.2)

$$\begin{aligned}
 1) \text{ Mediana } (Md_\phi) &= \phi_{50} \\
 2) \text{ Media } (Mz) &= \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \\
 3) \text{ Desviación Standard } (\sigma_1) &= \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \\
 4) \text{ Asimetría } (SK_1) &= \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \\
 5) \text{ Curtosis } (K_G) &= \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}
 \end{aligned}$$

Figura 5. 862 Ecuaciones para calcular parámetros sedimentológicos (Folk, 1978).

El análisis de la desviación estándar se calcula con la ecuación dada anteriormente, y también se hace uso de los siguientes parámetros sedimentológicos.

Tabla 5. 2 Clasificación de partículas de acuerdo a la desviación estándar (Folk 1980)

Desviación Estandar (σ_1)	Índice de Clasificación
< 0.35	Muy bien clasificado
0.35-0.50	Bien clasificado
0.50-0.70	Moderadamente bien clasificado
0.70-1.00	Moderadamente clasificado
1.00-2.00	Mal clasificado
2.00-4.00	Muy mal clasificado
>4.00	Extremadamente mal clasificado

El siguiente parámetro a analizar es la curtosis. Folk (1980) menciona que en una curva normal de probabilidad el diámetro entre el intervalo de ϕ_5 y ϕ_{95} debe ser 2.44 veces el diámetro entre el intervalo de ϕ_{25} y ϕ_{75} . Cuando se cumple lo anterior, se dice que la curtosis es normal y la gráfica será una línea recta. En otras palabras, la curtosis mide cuantitativamente la deformación de la curva. Dependiendo de la forma de la curva, lo cerrada que se encuentre y la forma de las “colas” (extremos) de dicha curva se le asignará un nombre en particular. Es por eso que nos ayudamos de parámetros respecto al valor de la curtosis (Tabla 5.3) y variación granulométrica con la medición de asimetría (Tabla 5.4).

Tabla 5. 3 Clasificación de la muestra respecto al parámetro de Curtosis. (Folk, 1980).

Límites de clase	Curtosis
<0.67	Muy platicurtica
0.67-0.90	Platicurtica
0.90-1.11	Mesocurtica
1.11-1.50	Leptocurtica
1.50-3.00	Muy Leptocurtica
>3.00	Extremadamente Leptocurtica

Tabla 5. 4 Clasificación de la muestra respecto a los valores de Asimetría (Folk, 1980).

Límites de clase (Sk_1)	Índice de Asimetría
+1.00 a +0.30	Muy asimétrico hacia las partículas finas
+0.30 a +0.10	Asimétrico hacia las partículas finas
+0.10 a -0.10	Simétrico

-0.10 a -0.30	Asimétrico hacia las partículas gruesas
-0.30 a -1.00	Muy asimétrico hacia las partículas gruesas

El tipo de ambiente sedimentario de las arenas se determinó de acuerdo a su asimetría (Tabla 5.4) y clasificación con el gráfico de Bjorlykke (1984), (Figura 5.8).

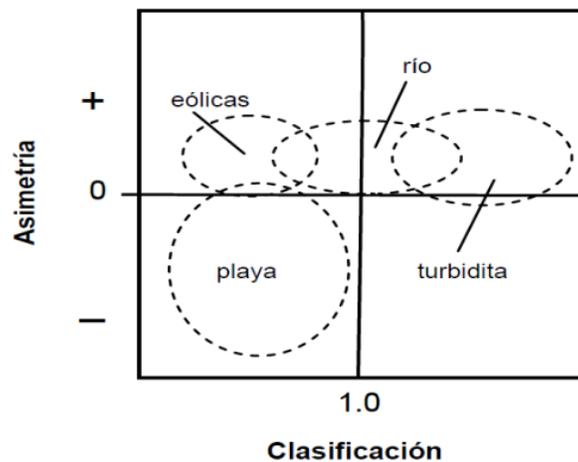


Figura 5. 943 Clasificación del ambiente sedimentario de la muestra respecto al valor de su Asimetría. (Bjorlykke, 1984).

- **5.2. Espectrometría Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)**

Se define la propagación como un mecanismo de transporte de energía en el espacio y tiempo.

Una onda es una propagación de una perturbación de alguna propiedad en un medio determinado.

Ejemplos de propiedades son la densidad, la presión, el campo eléctrico o el campo magnético.

Ejemplos de medios de propagación son el aire, el agua, un metal o el vacío.

Una onda electromagnética es la propagación simultánea de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento, (Sabins, 2007).

El espectro electromagnético es el continuo de energía que va desde kilómetros a nanómetros en longitud de onda, que viaja a $3 \cdot 10^8$ m/s y es capaz de propagarse a través de un vacío como el

espacio exterior. Toda la materia irradia un rango de energía electromagnética, con la intensidad máxima cambiando hacia longitudes de onda progresivamente más cortas con el aumento de la temperatura. (Sabins, 2007).

Hay cuatro parámetros generales que describen la capacidad de un espectrómetro:

1. El rango espectral.
2. El ancho de banda espectral.
3. El muestreo espectral.
4. La señal de ruido.

El rango espectral es importante para cubrir suficientes absorciones espectrales de diagnóstico para resolver un problema deseado, en este caso la respuesta reflectaba de minerales de alteración o intemperismo y asociados a anomalías de litio. Existen varios rangos espectrales que son usados comúnmente para este tipo de análisis (Figura 5.9).

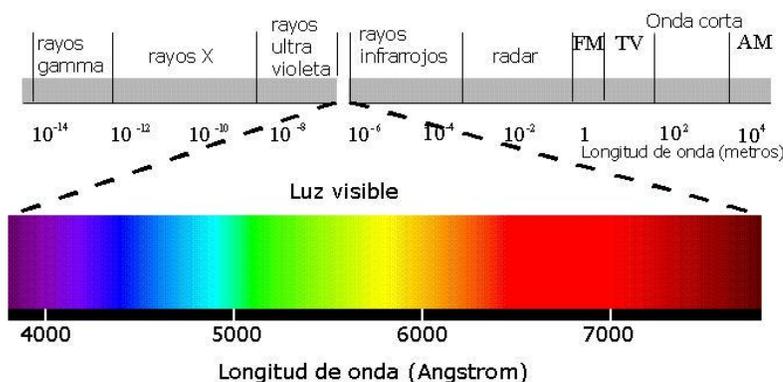


Figura 5. 1024 Rango del espectro electromagnético, en este caso para la utilización de la técnica, va del rango de 10^{-6} y 10^{-4} . (Ojeda-Durán,2018)

El primer rango es el ultravioleta (UV): 0.001 a 0.4 μm , el segundo es el espectro visible: 0.4 a 0.7 μm , el tercero es el infrarrojo cercano (NIR): 0.7 a 3.0 μm (dentro de este espectro nos interesa el rango que va de 1.0 a 2.5 μm , el cual se refiere a las ondas cortas infrarrojas SWIR), el cuarto

es el infrarrojo medio (MIR): 3.0 a 30 μm y el quinto es el infrarrojo lejano (FIR): 30 μm a 1 mm (Clark, 1999).

La espectroscopia es el estudio de la luz como una función de la longitud de onda que ha sido emitida, reflejada o dispersada desde un sólido, líquido o gas (Clark, 1999). La espectrometría de reflectancia es una técnica analítica utilizada desde principios del siglo XX por químicos y mineralogistas para la identificación de ciertos compuestos y minerales.

Los primeros datos de espectros en la zona de SWIR (Short Wave Infra Red, por sus siglas en inglés) fueron publicados entre 1905 y 1910 por W.W. Coblents. A mediados de 1940 se desarrollaron los primeros espectrómetros comerciales. A partir de 1970 se comenzó a formar una base de datos con imágenes espectrales (Páez, 2008). (Figura 5.10).

La espectroscopia va ligada con la absorción y dispersión de fotones característicos de fases minerales. La variación del proceso de absorción y su longitud de onda (Figura 5.10.) nos permite obtener información acerca de la química del mineral a partir de la luz emitida o reflejada (Clark, 1999).

El infrarrojo de onda corta (SWIR) se define generalmente como un rango de longitud de onda de 1,400 a 3,000 nm, pero es algo diferente en el rango de longitud de onda dependiendo del campo de investigación. En exploración geológica, se utilizan bandas de longitud de onda con longitudes entre 1.300 y 2.500 nm. Esta área se usa principalmente para la onda electromagnética mediante enlaces Al-OH, Mg-OH, Fe-OH y diversos grupos funcionales como H₂O, CO₂, SO₄ en minerales de silicatos, (Kim, 2017).

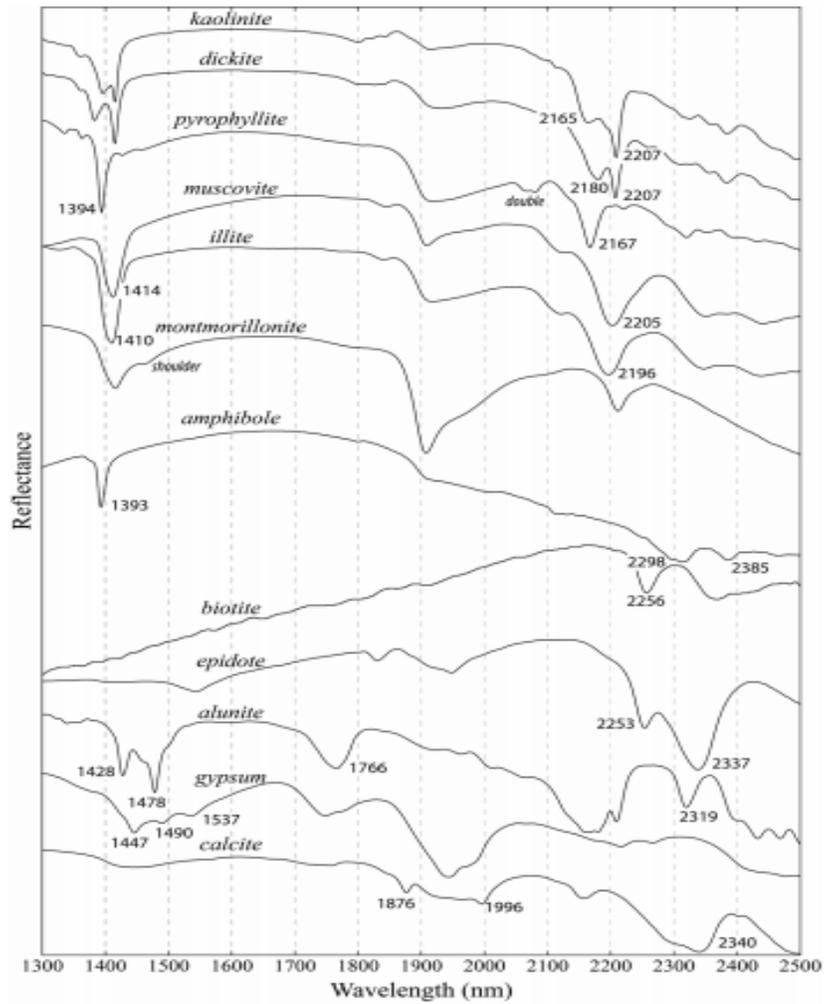


Figura 5. 1105 Espectros de reflectancia infrarrojo de onda corta (SWIR) de minerales típicos de alteración, (Kim, 2017).

La posición y la forma en 2,160 ~ 2,330 nm, otras características espectrales de los minerales de alteración hidrotermal por espectroscopía SWIR podrían usarse para una clasificación de la zona de alteración en campo.

Los picos de absorción en 2,160~2180 nm son útiles para identificar la zona argílica (avanzada) por las características espectrales de caolinita, dickita, pirofilita y alunita.

Los picos de absorción en 2,180 ~ 2,230 nm pueden definir la muscovita, la sericita y la esmectita, que son minerales de alteración en la zona fílica.

Los picos de absorción en 2.230 ± 2.270 nm se pueden utilizar para reconocer la zona propilítica donde se producen clorita y epidota. Los picos de absorción de otros minerales principales como

el talco, la serpentina, el anfíbol y el grupo carbonato se detectan principalmente dentro de la longitud de onda de 2.270 ± 2.330 nm. Este resultado indica que los espectros de estos minerales deben interpretarse cuidadosamente, (Kim, 2017).

El siguiente análisis de Espectrometría de Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) se realizó en el Instituto de Geofísica de la UNAM. El modelo del espectrómetro que se utilizó fue OreXpress SM3500 (Spectral Evolution), con un software analizador EZ-ID, permite identificar rápidamente los minerales asociados de una roca, esto haciendo coincidir nuestra firma espectral con la base de datos cargados en el software de la USGS.

Es necesario calibrar el equipo sobre una placa de polímero, ejecutando un disparo por 10 segundos (Figura 5.11), esto para obtener un rango estándar y que nuestros datos sean los más correctos posibles.

Esta herramienta nos proporciona los espectros o bandas de vibración de los enlaces que se forman.

El rango utilizado para medir el espectro que abarca del espectro visible al infrarrojo de los 350 nm a los 2500 nm.

Los espectros obtenidos de las muestras de arenas, evaporitas y arcillas es la curva azul y se compararon con los espectros del USGS (curva roja) y los resultados fueron los siguientes:



Figura 5. 1186 Imagen del equipo OreXpress (Spectral Evolution) calibrando el equipo antes de realizar el análisis de las muestras.

5.3. Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X, es una técnica analítica que puede determinar la composición química de todo tipo de materiales, estos pueden estar en sólidos, líquidos, materiales retenidos en filtros u otra forma. La técnica puede ser rápida dependiendo del equipo a utilizar, en este trabajo se utilizó FRX de laboratorio y un equipo portátil de NITON FRX, el método con este equipo es rápido, exacto y no destructivo, y usualmente requiere de un mínimo de preparación de muestra o incluso ninguna, en particular cuando se buscan resultados cuantitativos.

En Geología es muy utilizada para detectar la concentración de elementos mayores o elementos traza en roca.

Rayos X

Los rayos-X pueden ser vistos como ondas electromagnéticas con sus longitudes de onda, o como haces de fotones con sus energías asociadas. Ambas visiones son correctas, pero una u otra es más fácil de entender dependiendo del fenómeno que se pretende explicar.

Otras ondas electromagnéticas incluyen la luz, ondas de radio y rayos gamma. La Figura 5.12 muestra que los rayos-X tienen longitudes de onda y energías entre los rayos gamma y la luz ultravioleta.

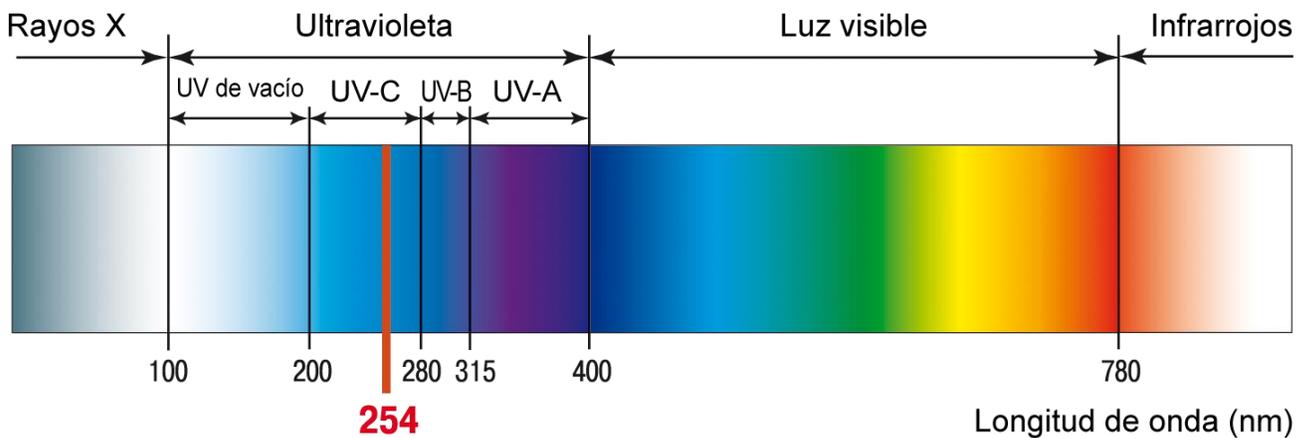


Figura 5. 1267 Rayos X y otros tipos de radiación electromagnética. (Tomado de https://www.seekpng.com/ipng/u2w7i1e6i1u2t4q8_los-rayos-uv-de-menor-longitud-de-onda/)

Las longitudes de onda de los rayos-X están en el intervalo de 0.01 y 10 nm, lo que corresponde a energías en el intervalo de 0.125 a 125 keV. La longitud de onda de los rayos-X es inversamente proporcional a su energía, de acuerdo con $E \cdot \lambda = hc$. E es la energía en keV y λ la longitud de onda en nm. El término hc es el producto de la constante de Planck y la velocidad de la luz y tiene, usando keV y nm como unidades, un valor constante de 1.23985. (Lozano, 2010).

Hay tres tipos de interacciones importantes cuando los rayos-X inciden sobre la materia: fluorescencia, dispersión Compton y dispersión Rayleigh (Figura 5.13). Si un haz de fotones de rayos-X es dirigido hacia la superficie de un material una fracción pasará a través del material,

otra fracción será absorbida (produciendo radiación fluorescente), y otra fracción será retrodispersada. La dispersión puede ocurrir con pérdida de energía o sin pérdida de energía. La primera es conocida como dispersión Compton y la segunda como dispersión Rayleigh.

La fluorescencia y la dispersión dependen del espesor (d), de la densidad (ρ), de la composición del material, y de la energía de los rayos-X.

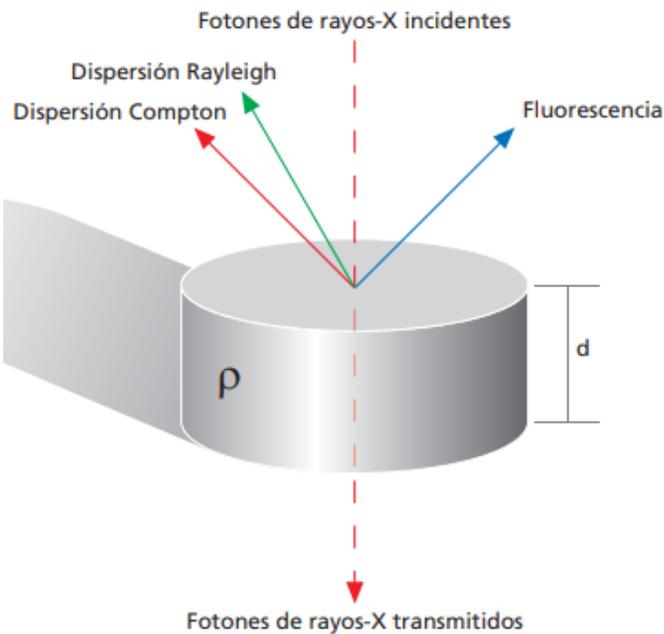


Figura 5. 1268 Las tres principales interacciones de los Rayos-X con la materia, (Lozano, 2019).

Resumen del proceso de Fluorescencia de Rayos X:

1. Se hace incidir sobre la muestra un haz de rayos X.
2. Este haz golpeará a un electrón interno del átomo que saldrá disparado.
3. Al haber un espacio vacante en un orbital interno del átomo se crea una situación inestable y uno de los electrones de un orbital más externo cae hacia el hueco que ha dejado el anterior.
4. Este salto produce una energía característica de cada elemento y es leída por el detector.

(Figura 5.14).

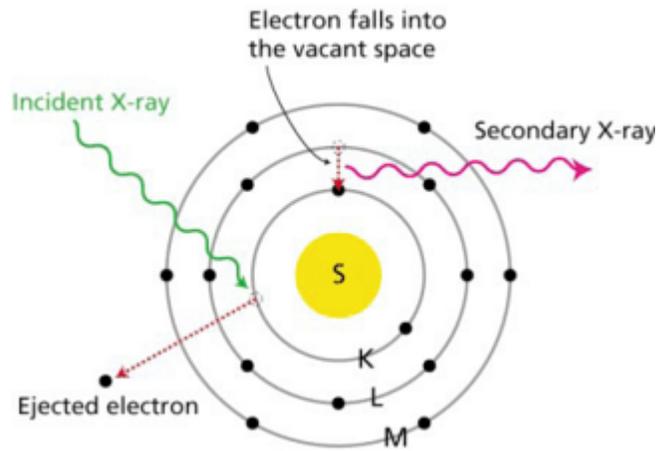


Figura 5. 1510 Proceso de fluorescencia de rayos X. (Lozano,2019)

Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX)

Espectrómetro consta de una fuente, una muestra y un sistema de detección. La fuente irradia la muestra, y el detector mide la radiación emitida por la muestra (Figura 5.15).

Los espectrómetros pueden ser divididos en dos grupos principales: sistemas dispersivos de energía (ED-XRF, por sus siglas en inglés) y sistemas de dispersión de longitudes de onda (WD-XRF, por sus siglas en inglés).. Los elementos que pueden ser analizados y sus niveles de detección dependen principalmente del tipo de espectrómetro usado. El intervalo elemental para ED-FRX incluye del Na al U. Para WD-FRX es aún más amplio, ya que incluye desde el Be al U. (Lozano, 2019).

Los espectrómetros ED-FRX tienen un detector que es capaz de medir las diferentes energías de la radiación característica procedente directamente de la muestra. El detector puede separar la radiación procedente de la muestra en la radiación procedente de cada elemento de la muestra. Esta separación es llamada dispersión.

Los espectrómetros WD-FRX usan un cristal analizador para dispersar las diferentes energías. Toda la radiación procedente de la muestra incide en dicho cristal, el cual difracta las diferentes energías en diferentes direcciones, similar a un prisma que dispersa diferentes colores en diferentes direcciones. (Lozano, 2019).

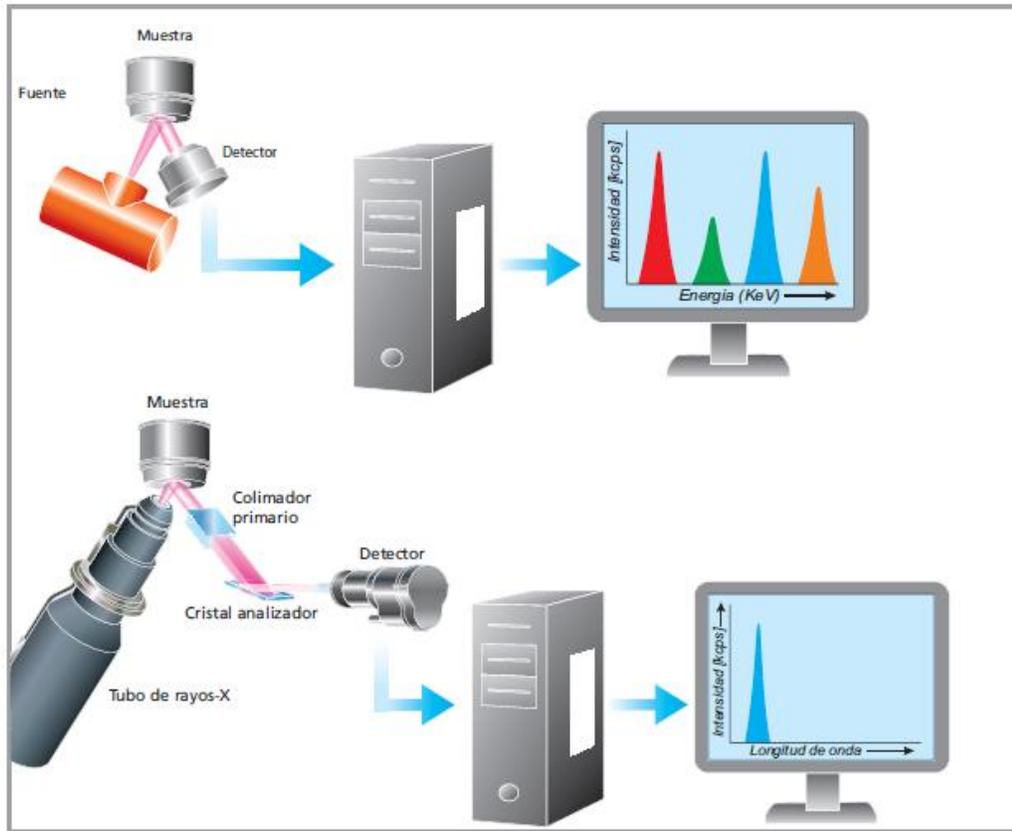


Figura 5. 1742 Diseño básico de espectrómetros de ED-FRX (Primer figura arriba) y EW-FRX (segunda figura abajo). (Lozano, 2019).

La precisión y la reproducibilidad de los análisis por FRX son muy altas. Es posible obtener resultados exactos cuando se dispone de buenos materiales de referencia, pero también es posible en aplicaciones donde no se cuentan con estándares específicos.

El tiempo de medición depende del número de elementos a determinar y de la exactitud requerida, y varía entre segundos y 30 minutos. El tiempo de análisis después de la medición es de sólo algunos segundos.

La Figura 5.16, muestra un espectro típico de una muestra de suelo medida con ED-FRX, la posición de los picos determina los elementos presentes en la muestra, en tanto que la altura de los picos determina las concentraciones relativas.

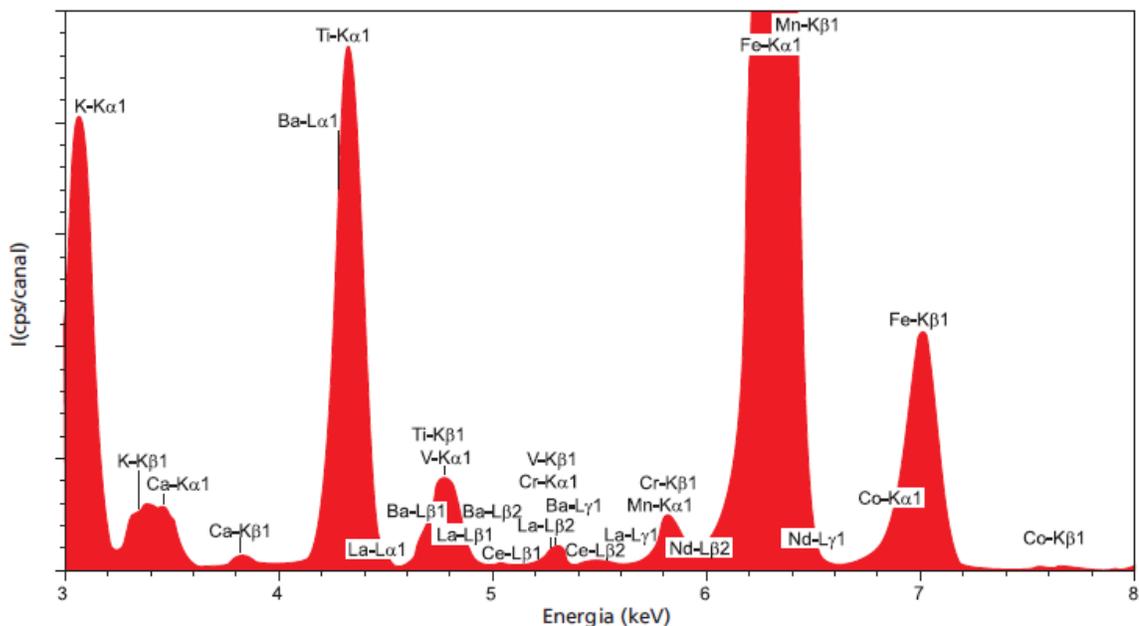


Figura 5. 1934 Espectro de una muestra de suelo medida con un espectrómetro de ED-FRX. (Lozano, 2019)

Los estudios de fluorescencia de rayos X fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología UNAM.

Las muestras fueron secadas previamente en horno a 110°C por 12 horas. El análisis se realizó, en el espectrómetro Rigaku Primus II empleando la aplicación EZscan pre-calibrada para análisis semi-cuantitativo. Se realizó análisis semicuantitativo para las 5 muestras LT-1, LT-3, LS-A-1, LT-1 QZ, LT-3 Qz, estos dos últimos LT-1 QZ es la muestra de cuarzo seleccionado de las arenas LT-1, lo mismo para la muestra LT-3. Estos análisis fueron realizados por Quim. Rufino Lozano encargado del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, UNAM.

El análisis se realizó en Modo Suelos, en el espectrómetro portátil NITON X13t (PXRFS). Previo a la medición de las muestras problema, se midieron el blanco de cuarzo, y los estándares SRM2710a 2711a, con los que se determinó la correcta calibración del PXRFS realizado por la QFB. Fabiola Vega.

5.3.1. Analizador portátil de PXRF (NITON)

Niton PXRF desempeña el mismo principio de fluorescencia de rayos X como un instrumento de mesa, pero puede ser llevado a cualquier parte y realizar análisis al aire libre en afloramientos, gabinete, en la mina, proyectos de exploración, o en cualquier otro lugar de difícil acceso. (Figura 5.17).

Si bien los análisis de laboratorio seguirán siendo el estándar para proporcionar datos de mayor calidad y confiabilidad posible, estas mediciones pueden ser costosas y requieren un mayor tiempo de análisis, en cambio con FRX portátil es más práctico y su análisis es casi inmediato, proporcionando información que nos puede ayudar a tomar decisiones rápidas en cuanto a la concentración de ciertos elementos de interés.



Figura 5. 2046 Analizador de FRX portátil (modelo NITON X-L3t). Tomado Niton, 2010.

Componentes:

Al igual que los instrumentos ópticos, se utilizan tanto fotómetros como espectrofotómetros de rayos X, los primeros utilizan filtros y los segundos monocromadores para seleccionar la radiación de la fuente.

1. Fuentes: tubo de rayos X
2. Filtros para haces de rayos X
3. Monocromadores: dispersión de longitud de onda
4. Detectores de rayos X: recuento de fotones.
5. Procesadores de señal: selectores y analizadores de alturas de impulsos, escalas y contadores. (Niton, 2010))

Función del analizador portátil FRX.

Una fuente de rayos-X impacta a la muestra, los rayos X provocan que los átomos individuales sean excitados y al regresar a su estado basal emitan un espectro de rayos X característicos para cada elemento. La energía emitida es captada por el detector del analizador, el detector convierte los rayos X en una señal eléctrica, cada señal es contada y la información se almacena en un procesador, las intensidades son transformadas matemáticamente a una concentración relativa de ppm o por ciento (%) y esta es enviada a la pantalla y a la memoria donde se cuantifica.(Niton, 2010)

Modos de lectura

El equipo cuenta con varias modalidades debido a que las muestras composicionalmente son distintas, desde diversos puntos de vista: geológico, mineralógico, etc. El modo de lectura dependerá del material a analizar y si se conoce un aproximado de las concentraciones de los elementos a determinar (si las concentraciones están en el orden de ppm (mg/kg) o de porcentaje (%)). Las modalidades de lectura están configuradas según la aplicación para la cual se utilizarán los resultados.(Niton, 2010).

Análisis cuantitativo

Se obtiene mediante la medida de las intensidades de las energías emitidas por la muestra que corresponde a las áreas de los picos, lo cual es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. Para obtener el valor de la concentración utilizamos métodos de estandarización.

Ventajas y desventajas

Una de las ventajas de este método analítico portátil, es que se puede ejecutar un análisis en campo de forma rápida, no destructivo, que reconoce un gran número de elementos químicos y presenta los resultados en tiempo real, permitiendo tomar decisiones rápidas.

La desventaja radica en los límites de detección para algunos elementos están en el orden de 20 ppm, lo que puede ser alto en algunos casos de elementos minoritarios. Para el caso de elementos ligeros no da buenos resultados.

Los espectrómetros FRX portátiles le permiten llevar el analizador con batería hasta la muestra en lugar de desplazar la muestra hasta el laboratorio, lo cual resulta especialmente útil en el caso de especímenes de muestra grandes o pesados (Niton, 2010).

- **CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

- **6.1 RESULTADOS**

En este capítulo se describen los resultados obtenidos del estudio granulométrico de las arenas, los análisis de SWIR y los análisis de Fluorescencia de rayos X.

En el caso de las arenas encontramos los siguientes resultados:

MUESTRA LT-1

Tabla 6. 1 Datos obtenidos por tamiz muestra LT-1

	Φ	Peso (grs)	Peso Acumulado	% Peso	% Acumulado
LT-1	-1.25	19.9	19.9	14.24	14.24
	-0.74	5.6	25.5	4.01	18.25
	-0.49	13	38.5	9.31	27.56
	-0.25	14.5	53	10.38	37.94
	0	14.6	67.6	10.45	48.39
	0.23	26.4	94	18.90	67.29
	2	40.4	134.4	28.92	96.21
	2.7	2.3	136.7	1.65	97.85

	3.23	0.8	137.5	0.57	98.43
	3.73	0.7	138.2	0.50	98.93
	4.47	0.8	139	0.57	99.50
	5	0.7	139.7	0.50	100.00

HISTOGRAMA LT-1

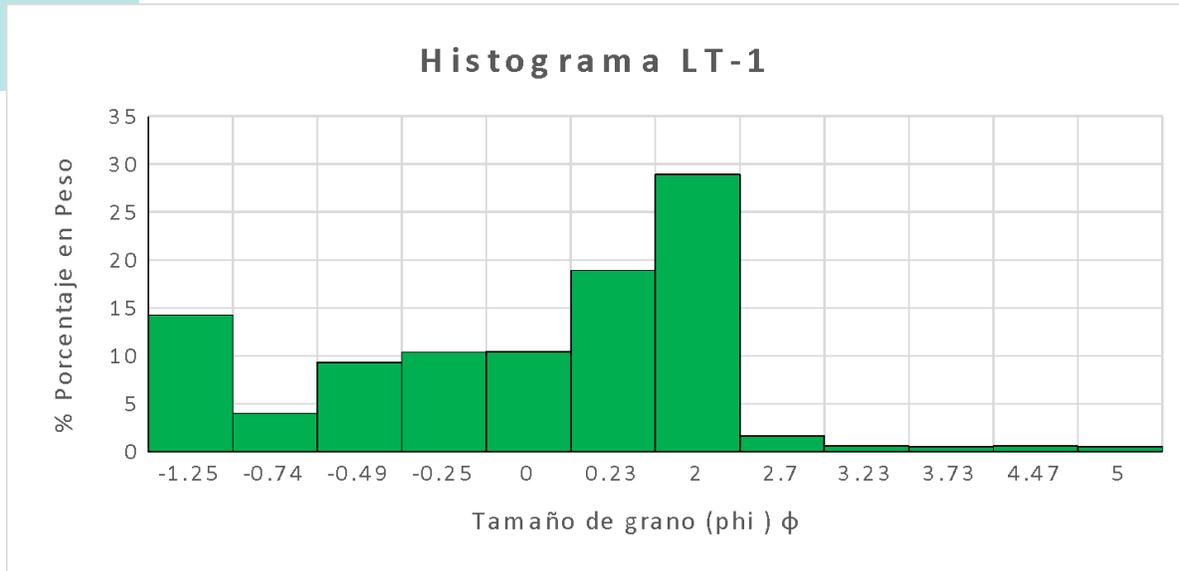


Figura 6. 1 Histograma que representa la distribución del tamaño de grano respecto al porcentaje en peso.

Histograma que representa en el eje de las abscisas la granulometría correspondiente a escala (phi), y en el eje de las ordenadas al porcentaje en peso (%), se observa una tendencia o concentración hacia las arenas medias a gruesas, donde el porcentaje en peso presenta un mayor incremento en granulometría phi con valor de 2, excede un 25% sobre el total de la muestra.

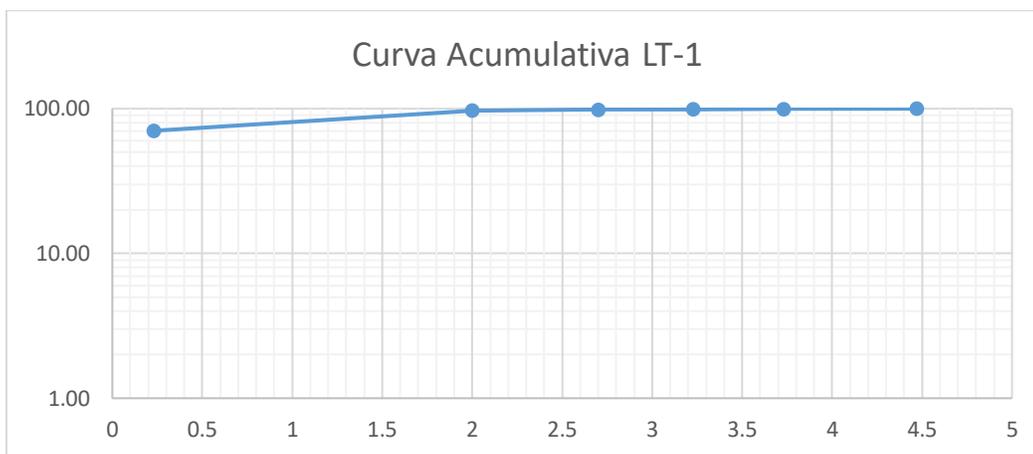


Figura 6. 2 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi.

Con la respectiva gráfica, podemos obtener los siguientes valores de percentiles y cuartiles: ϕ_5 , ϕ_{16} , ϕ_{25} , ϕ_{50} , ϕ_{75} , ϕ_{84} , ϕ_{95} (Tabla 6.2) para obtener la media, desviación estándar y curtosis, mismos que servirán para su análisis sedimentológico (Tabla 6.3).

Tabla 6. 2 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa.

Percentiles y Cuartiles	VALOR
ϕ_5	2
ϕ_{16}	1.4
ϕ_{25}	0.70
ϕ_{50}	0
ϕ_{75}	0
ϕ_{84}	0
ϕ_{95}	-----

Tabla 6. 3 Resultados obtenidos, parámetros estadísticos.

Parámetro	Valor	Clasificación
Mz ϕ	0	Arena muy gruesa
Desviación Estándar	0.38	Bien clasificado
Asimetría	0.48	Muy Simétrica
Curtosis	0.65	Muy Platicurtica

De acuerdo a los valores obtenidos de desviación estándar, en la siguiente tabla se muestra el ambiente de formación al que pertenece:

Tabla 6. 4 Clasificación de arenas basada en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017).

Clasificación de arenas basadas en su Desviación Estándar		
Rango de valores. Desviación Estándar	Clases de Clasificación	Ambiente sedimentario
<0.35	Muy bien clasificado	Dunas costeras y lagos; muchas playas (foreshore); comúnmente sobre la plataforma marina somera.
0.35-0.50	Bien clasificado	La mayoría de las playas (foreshore); plataformas marinas somera; muchas dunas tierra adentro
0.50-0.80	Moderadamente bien clasificado	La mayoría de las dunas tierra adentro; muchos ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
0.80-1.40	Moderadamente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales; ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
1.40-2.00	Pobrementemente clasificado	Muchos marcos glaciofluviales
2.00-2.60	Muy pobremente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales
>2.60	Extremadamente pobremente clasificado	Algunos marcos glacio-fluviales

RESULTADOS GRANULOMETRICOS MUESTRA LT-3

Tabla 6. 5 Datos obtenidos del proceso de tamizado muestra LT-3

LT-3	Φ	Peso (grs)	Peso Acumulado	% Peso	% Acumulado
	-1.25	24.6	24.6	9.76	9.76
-0.74	11.2	35.8	4.44	14.20	
-0.49	18.1	53.9	7.18	21.38	
-0.25	15.7	69.6	6.23	27.61	
0	12.1	81.7	4.80	32.41	
0.23	42.8	124.5	16.98	49.39	
2	111.2	235.7	44.11	93.49	
2.7	9.6	245.3	3.81	97.30	
3.23	2.5	247.8	0.99	98.29	
3.73	1.6	249.4	0.63	98.93	
4.47	1.5	250.9	0.60	99.52	
-4.47	1.2	252.1	0.48	100.00	

HISTOGRAMA LT-3

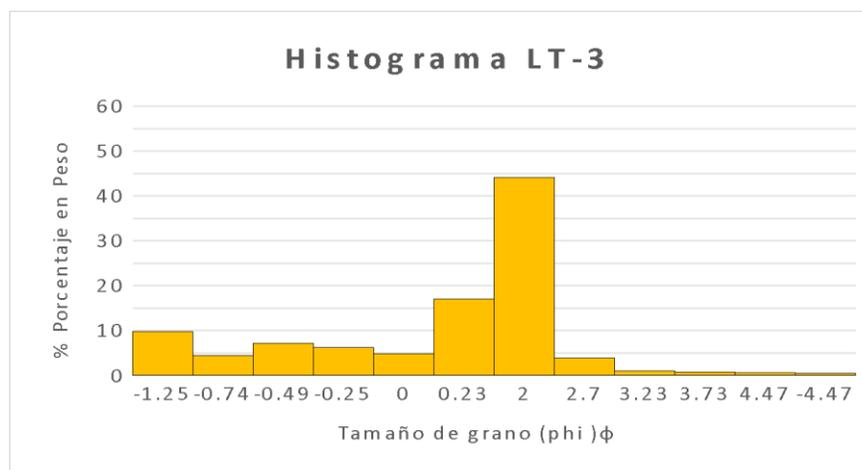


Figura 6. 3 Histograma que representa la distribución del tamaño de grano respecto al porcentaje en peso.

La siguiente gráfica, representada por el eje de las abscisas, muestra el diámetro expresado en phi, y el eje de las ordenadas el porcentaje en peso, en la cual se observa el mayor contenido de material retenido de 0 a 2 phi, lo que indica que hay mayor contenido de arenas gruesas a arenas medias (Figura 6.4).

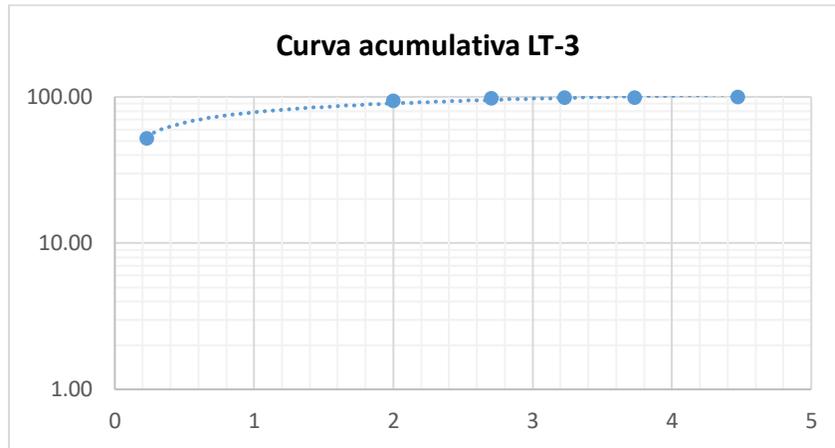


Figura 6. 4 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi de la muestra LT-3.

Con la respectiva gráfica, podemos obtener los siguientes valores de percentiles y cuartiles, para obtener la media, desviación estándar y curtosis, mismos que servirán para su análisis sedimentológico (Tablas 6.6 y 6.7).

Tabla 6. 6 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa

Percentiles y Cuartiles	VALOR
$\phi 5$	2
$\phi 16$	1.65
$\phi 25$	1.24
$\phi 50$	0.63
$\phi 75$	0
$\phi 84$	0
$\phi 95$	-----

Tabla 6. 7 Resultados obtenidos, parámetros estadísticos.

Parámetro	Valor	Clasificación
Mz ϕ	0.63	Arena gruesa
Desviación Estándar	0.30	Muy bien clasificada
Asimetría	0.026	Simétrica
Curtosis	0.694	Platicúrtica

De acuerdo a los valores obtenidos de desviación estándar, en la siguiente tabla se muestra el ambiente de formación al que pertenece, mediante la estadística (Tabla 6.8):

Tabla 6. 8 Clasificación de arenas basadas en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017).

Clasificación de arenas basadas en su Desviación Estándar		
Rango de valores de Desviación Estándar	Clases de Clasificación	Ambiente sedimentario
<0.35	Muy bien clasificado	Dunas costeras y lagos; muchas playas (foreshore); comúnmente sobre la plataforma marina somera.
0.35-0.50	Bien clasificado	La mayoría de las playas (foreshore); plataformas marinas somera; muchas dunas tierra adentro
0.50-0.80	Moderadamente bien clasificado	La mayoría de las dunas tierra adentro; muchos ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
0.80-1.40	Moderadamente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales; ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
1.40-2.00	Pobrementemente clasificado	Muchos marcos glaciofluviales
2.00-2.60	Muy pobrementemente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales
>2.60	Extremadamente pobrementemente clasificado	Algunos marcos glacio-fluviales

MUESTRA LS-A-1

Tabla 6. 9 Datos estadísticos de la muestra LS-A-1.

	Φ	Peso (grs)	Peso Acumulado	% Peso	% Acumulado
LS-1-A	-1.25	33.7	33.7	19.05	19.05
	-0.74	7	40.7	3.95	23.00
	-0.49	9.2	49.9	5.20	28.20
	-0.25	6.8	56.7	3.84	32.05
	0	4.2	60.9	2.37	34.42
	0.23	11	71.9	6.21	40.64
	2	44	115.9	24.87	65.52
	2.7	29.8	145.7	16.84	82.36
	3.23	10.9	156.6	6.16	88.52
	3.73	9	165.6	5.08	93.61
	4.47	7.7	173.3	4.35	97.96
	5	3.6	176.9	2.03	100

Histograma que representa en el eje de las abscisas la granulometría correspondiente a escala (phi), y en el eje de las ordenadas al porcentaje en peso (%), se observa una tendencia o concentración hacia las arenas medias a finas, donde el porcentaje en peso excede en granulometría phi con valor de 2 a 3, excede un 15% sobre el total de la muestra (Figura 6.5).

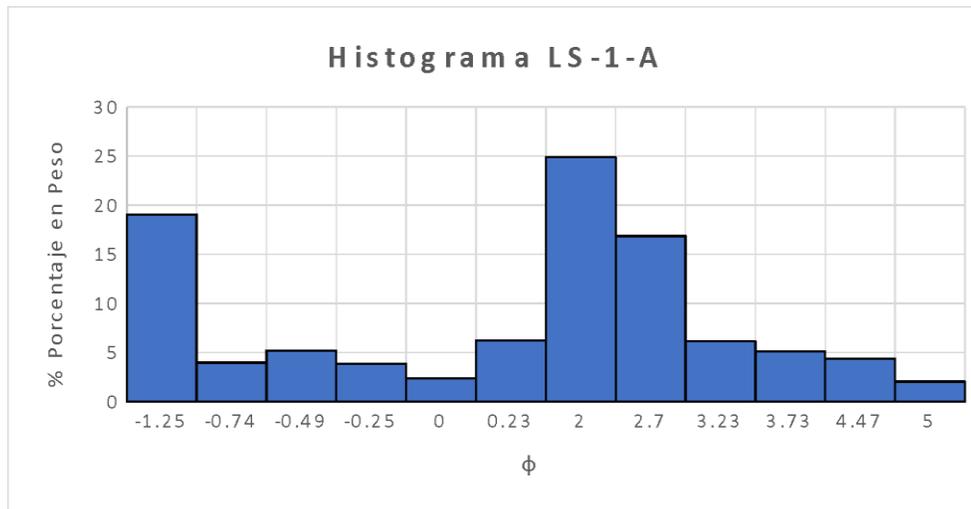


Figura 6. 5 Histograma que representa el porcentaje en peso y el diámetro de las arenas expresadas en phi. Con la respectiva gráfica, podemos obtener los siguientes valores de percentiles y cuartiles: ϕ_5 , ϕ_{16} , ϕ_{25} , ϕ_{50} , ϕ_{75} , ϕ_{84} , ϕ_{95} , para obtener la media, desviación estándar y curtosis, mismos que servirán para su análisis sedimentológico (Figura 6.6 y Tablas 6.10 y 6.11).

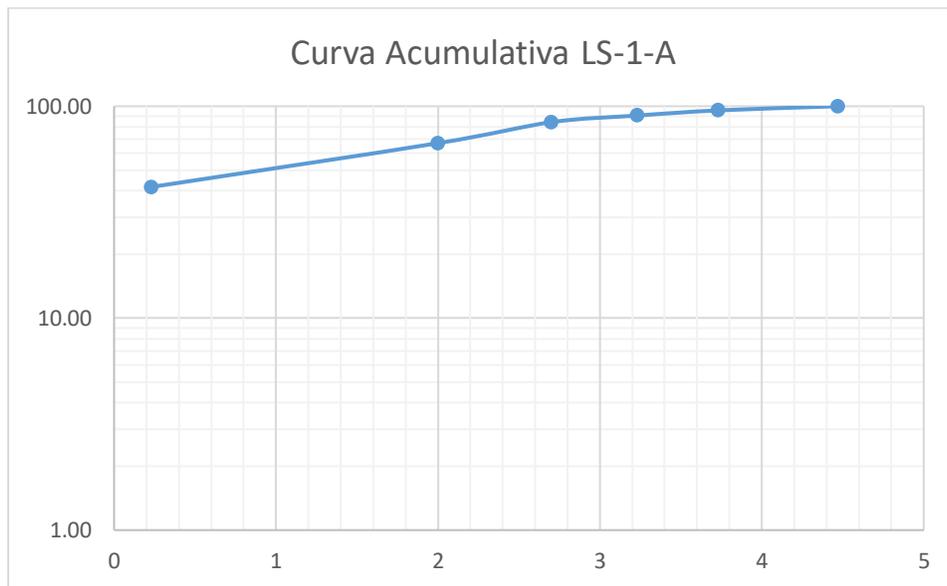


Figura 6. 6 Curva acumulativa que muestra la relación del porcentaje acumulado y el tamaño de grano expresado en phi.

Tabla 6. 10 Valores obtenidos mediante la curva acumulativa

Percentiles y Cuartiles	Valor
φ5	4
φ16	2.8
φ25	2.4
φ50	0.95
φ75	0
φ84	0
φ95	-----

Tabla 6. 11 Parámetros sedimentológicos

Parámetro	Valor	Clasificación
Mz φ	0.95	Arena gruesa
Desviación Estándar	0.37	Bien clasificada
Asimetría	-0.20	Asimétrica
Curtosis	-0.54	Muy Platicúrtica

De acuerdo a los valores obtenidos de desviación estándar, en la siguiente tabla se muestra el ambiente de formación al que pertenece (Tabla 6.12):

Tabla 6. 12 Clasificación de arenas basada en clases en su desviación estándar. Modificada de Friedman, 1962. (Tomado de Hernández, 2017)

Clasificación de arenas basadas en su Desviación Estándar		
Rangos de valores de Desviación Estándar	Clases de Clasificación	Ambiente sedimentario
<0.35	Muy bien clasificado	Dunas costeras y lagos; muchas playas (foreshore); comúnmente sobre la plataforma marina somera.

0.35-0.50	Bien clasificado	La mayoría de las playas (foreshore); plataformas marinas somera; muchas dunas tierra adentro
0.50-0.80	Moderadamente bien clasificado	La mayoría de las dunas tierra adentro; muchos ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
0.80-1.40	Moderadamente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales; ríos; algunas lagunas restringidas; plataformas marinas distales
1.40-2.00	Pobrementemente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales
2.00-2.60	Muy pobrementemente clasificado	Muchos marcos glacio-fluviales
>2.60	Extremadamente pobrementemente clasificado	Algunos marcos glacio-fluviales

- 6.1.1 Análisis por Espectrometría de infrarrojo de onda corta (SWIR) en arenas (Figura 6.7)
Análisis en arenas

Muestra LT-1

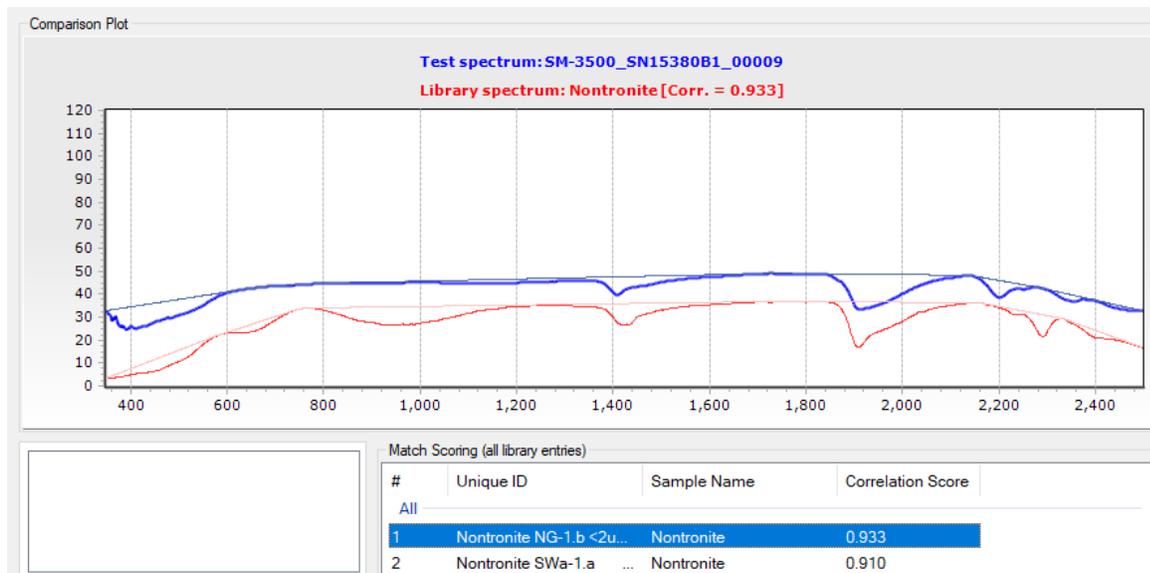


Figura 6. 7 Espectro SWIR de la muestra LT-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul) perteneciente al mineral Nontronita con una correlación de 0.93.

Los resultados de SWIR nos indica que la firma espectral pertenece a Nontronita, del grupo de las Esmectitas con contenido de hierro, en las arenas LT-1.

MUESTRA LT3

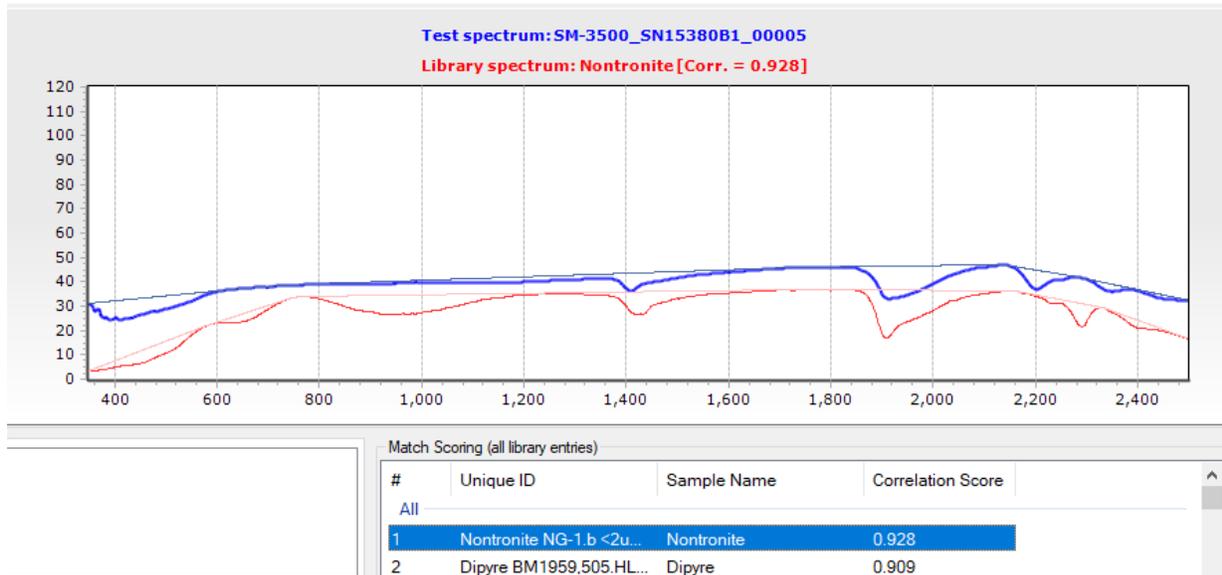


Figura 6. 8 Espectro SWIR de la muestra LT-3 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de Nontronita de 0.928

Los resultados de SWIR nos indica que la firma espectral pertenece al mineral Nontronita, del grupo de las Esmectitas con contenido de hierro.

MUESTRA LS-A-1

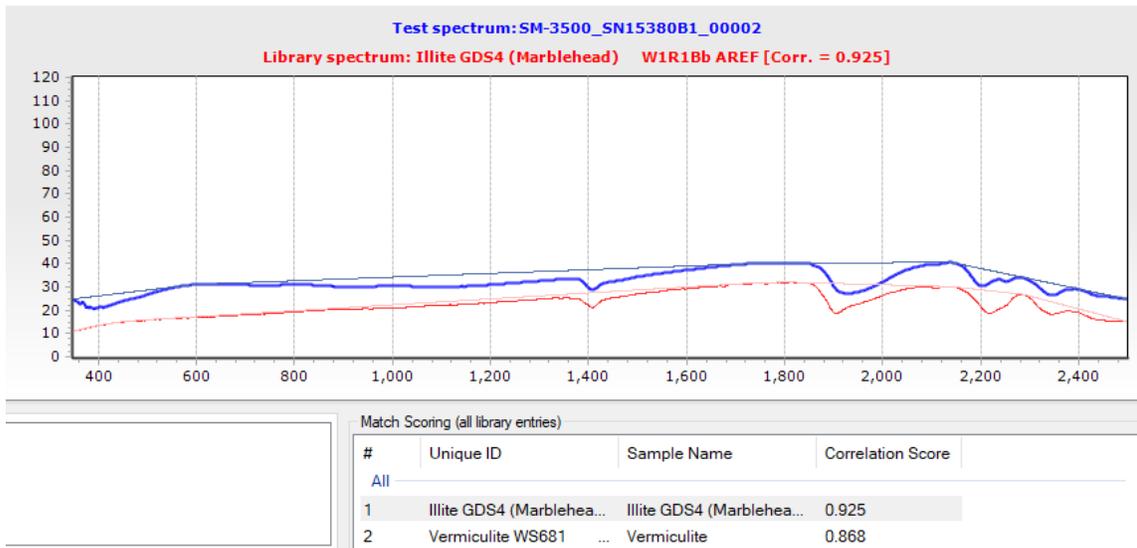


Figura 6. 9 Figura 6.9. Espectro SWIR de la muestra LS-A-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.92 con Illita.

El espectro de SWIR identifico el mineral Illita en las arenas de LS-A-1, mineral que pertenece al grupo de las arcillas.

EVAPORITAS

MUESTRA LS-L-A

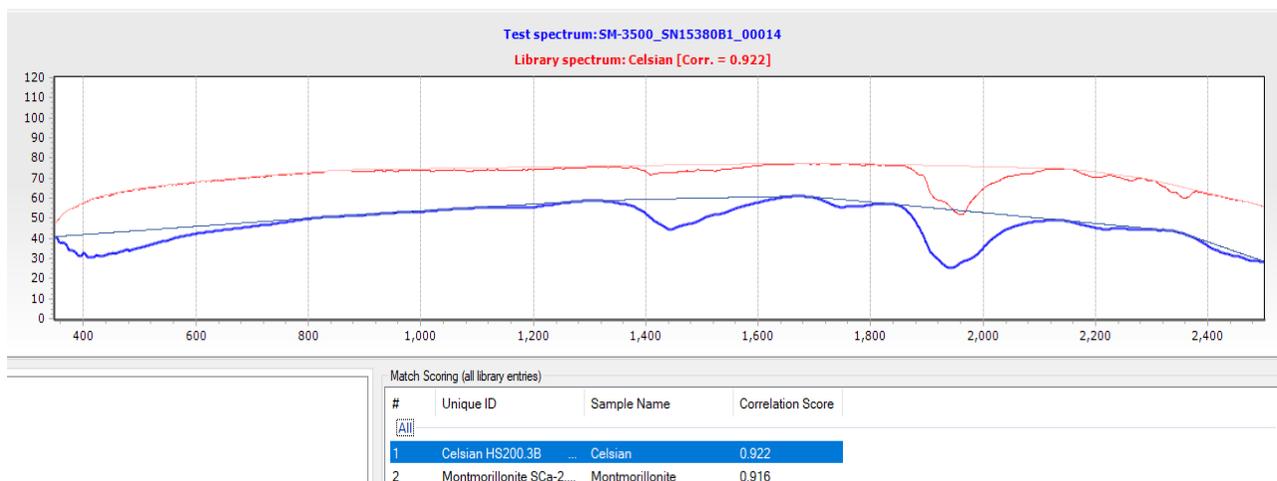


Figura 6. 10 Espectro SWIR de la muestra LS-L-A (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.916 con Montmorillonita

MUESTRA CP-b

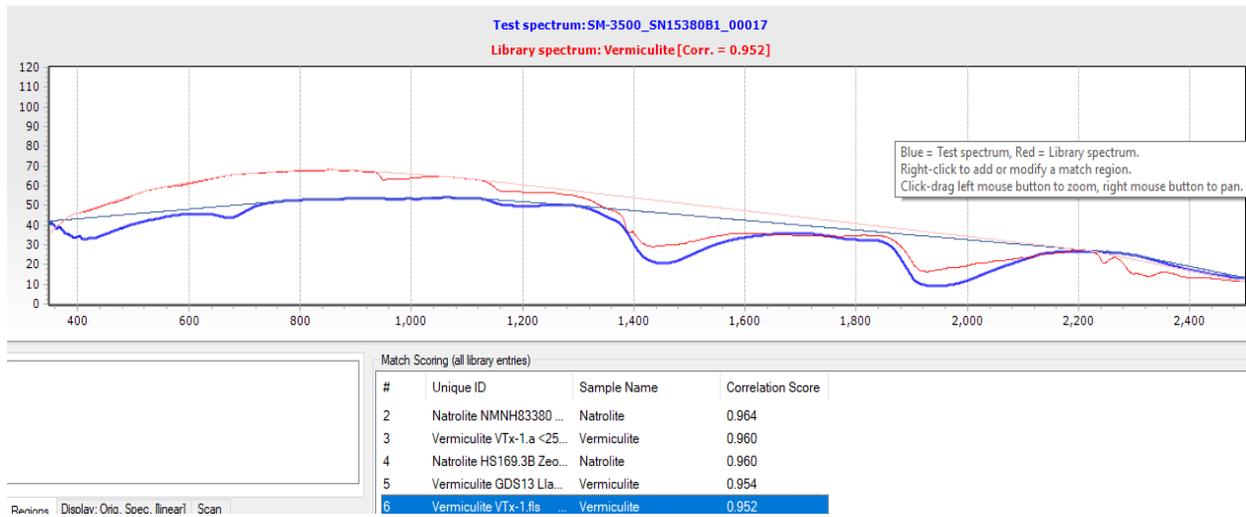


Figura 6.11 Espectro SWIR de la muestra CP-b (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul) muestra una correlación de 0.964 Natrolita mineral que pertenece al grupo de las zeolitas.

ARCILLAS

MUESTRA 18-18

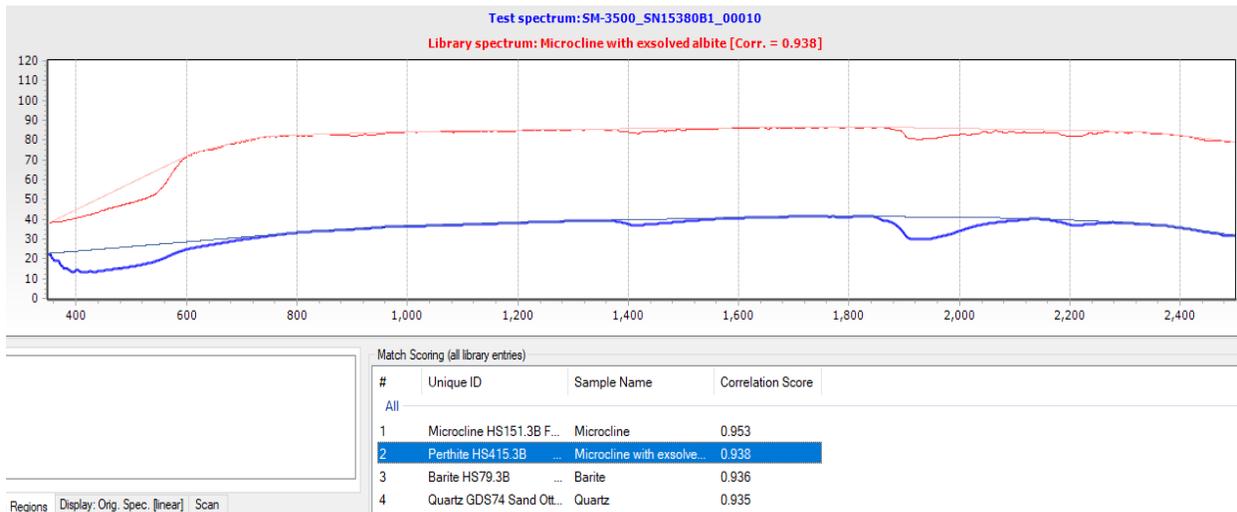


Figura 6.12 Espectro SWIR de la muestra 18-18 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.93 con Microclina

MUESTRA CP-a

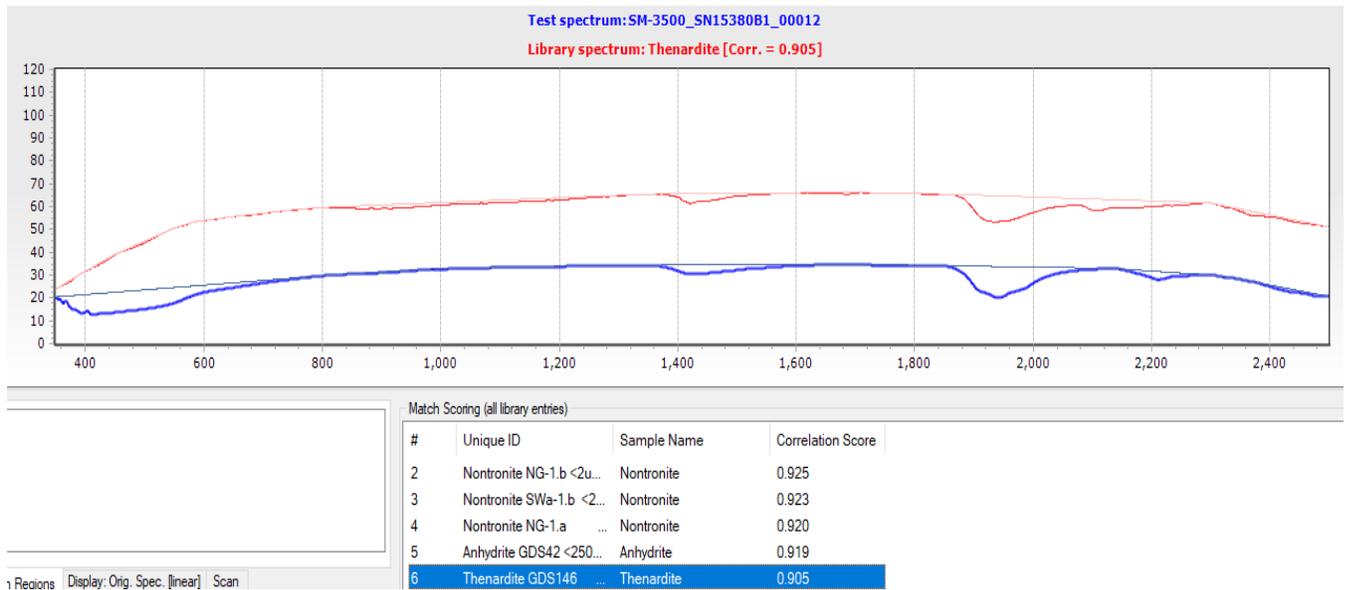


Figura 6. 13 Espectro SWIR de la muestra CP-a (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.905 con Tenardita

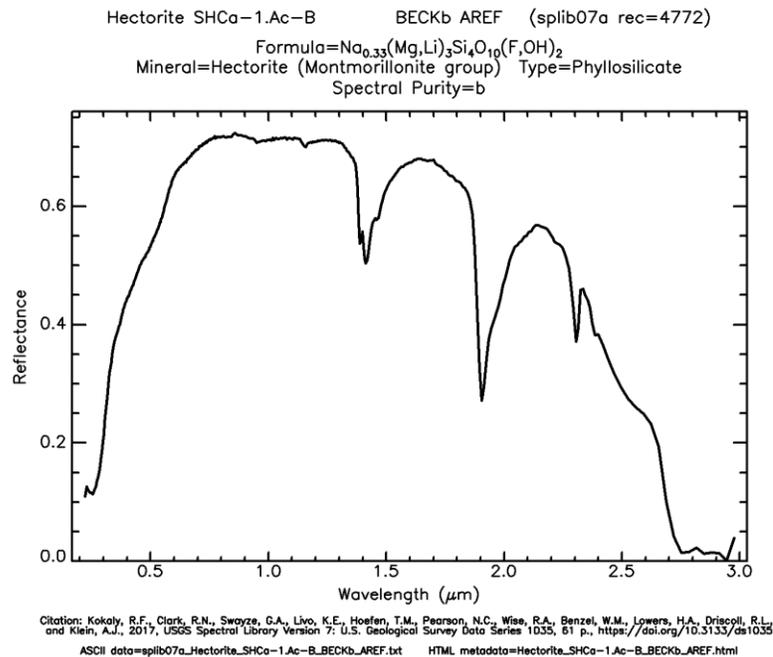


Figura 6. 14 Firma espectral del mineral **Hectorita** que muestra picos significativos de longitud de onda que coinciden con nuestra firma espectral de la muestra CP-a. Tomado de Spectral Library USGS 2020.

Para Hectorita se tienen estas longitudes de onda:

Tabla 6. 13 Longitudes de onda para el espectro de Hectorita (Modificado de Spectral Library, 1996)

Simbología: (SH: Shoulder, L: Large, B: Broad, MJ: Major S: Small)

HECTORITE Na(Li,Mg) Si4O10(F,OH)2								
HECTCA1	1396 (MD)	1418 (MD)	1464 (S)		1906 (MJ)	1944 (SH)	2290 (SH)	2310 (L)
HECTNV1	1384 (SH)	1414 (MJ)	1462 (SH)	1800 (B)	1906 (MJ)		2306 (M)	2390 (S)
HECTNV2	1372 (SH)	1402 (L)	1450 (SH)	1794 (B)	1902 (MJ)	1936 (SH)	2306 (M)	2382 (S)
HECTNV3	1374 (SH)	1400 (L)	1450 (SH)	1798 (B)	1900 (MJ)	1940 (SH)	2306 (M)	2388 (SB)

MUESTRA 18-18-1

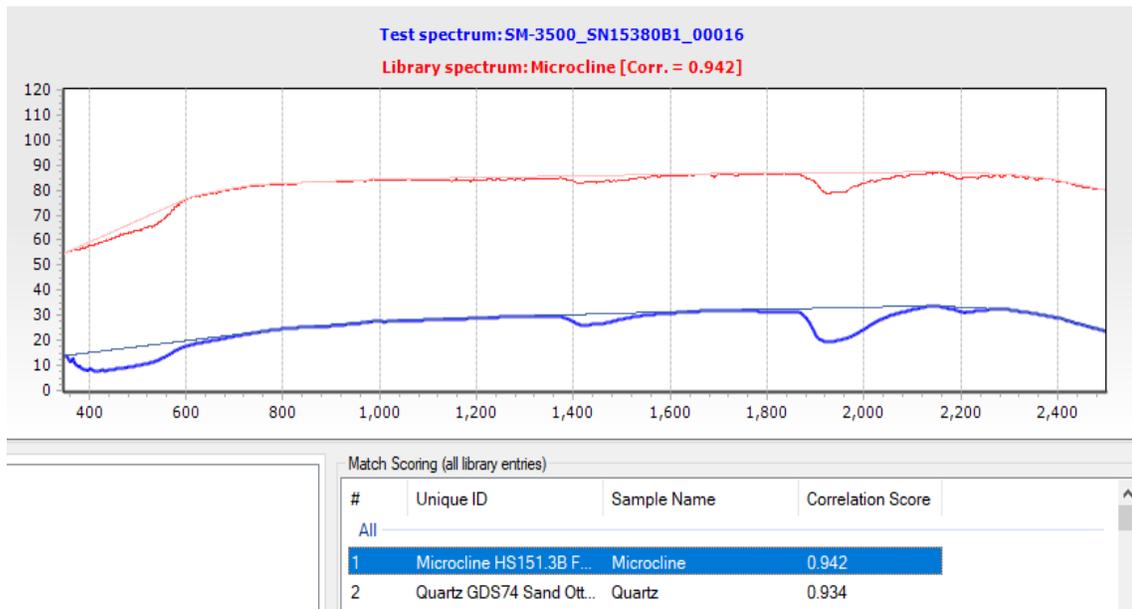


Figura 6. 15 Espectro SWIR de la muestra 18-18-1 (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.942 con Microclina.

MUESTRA LS-4A

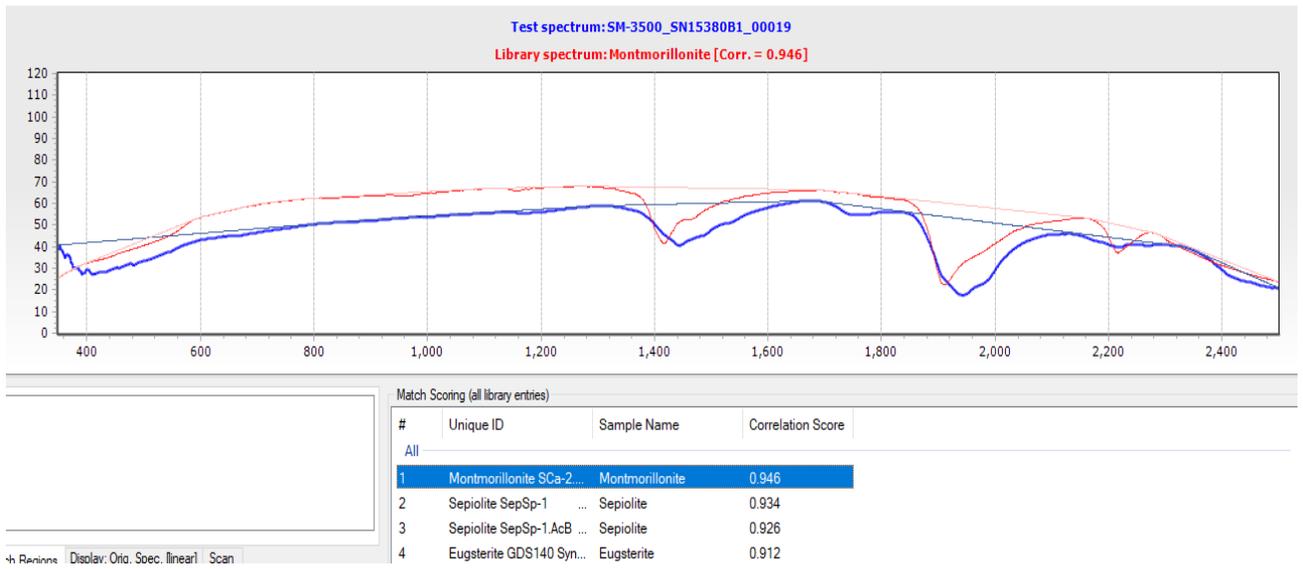


Figura 6. 16 Espectro SWIR de la muestra LS-4A (roja) que coincide con la firma de la base de datos de la USGS (azul), muestra una correlación de 0.942 con Montmorillonita.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Los resultados se presentan en la Tabla 6.13:

Tabla 6. 14 Resultados de Fluorescencia de Rayos X sobre muestras LT-1, LT-1 QZ, LT-3, LT3QZ, LS-A-1.

Componente	Unit	LT-1	LT-1 QZ	LT-3	LT3 QZ	LS-A-1
SiO2	mass%	69.326	93.8139	68.906	91.9653	65.1042
TiO2	mass%	0.2639	0.0496	0.3269	0.0519	0.3006
Al2O3	mass%	15.7292	2.3805	15.8432	3.2584	17.8285
Fe2O3t	mass%	2.6795	1.6169	2.5176	1.7286	2.481
MnO	mass%	0.0501	0.0136	0.0476	0.0134	0.0373
MgO	mass%	0.7321	0.0821	0.8244	0.0699	0.7505
CaO	mass%	2.5902	0.3185	2.8589	0.4346	3.5789
Na2O	mass%	4.0538	0.5636	3.9958	0.7177	5.3952
K2O	mass%	2.817	0.5967	2.8671	0.995	2.0585
P2O5	mass%	0.0833	0.0276	0.1075	0.029	0.1931
S	mass%	0.0073	0.0037	0.0073	0.003	0.0304
Cl	mass%	0.0158		0.0177		0.1424
Cr	mass%	0.0888	0.2065	0.0675	0.2116	0.0535
		0.0019	0.0026	0.002	0.0023	
Ni	mass%		0.0044	0.0031	0.0043	0.0033
Zn	mass%	0.0073		0.0075		0.0042
Rb	mass%	0.0107	0.0017	0.0095	0.0029	0.0064
Sr	mass%	0.0674	0.0083	0.0643	0.0129	0.0867
Y	mass%			0.0004		0.0002
Zr	mass%	0.0106	0.004	0.0059	0.0066	0.0118
Ba	mass%	0.0808		0.0845	0.0393	0.1485

Los resultados se presentan en las Tablas 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17:

Tabla 6. 15 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Mo, Zr, Sr, U, Rb, Th y Pb).

SAMPLE	Units	Mo	Mo Error	Zr	Zr Error	Sr	Sr Error	U	U Error	Rb	Rb Error	Th	Th Error	Pb	Pb Error
LT-3	ppm	5.77	1.57	103.29	2.96	500.9	4.7	< LOD	5.6	81.23	2.59	4.21	2.03	< LOD	4.53
LT-4	ppm	5.35	1.72	34.8	4.06	1483	9.05	< LOD	7.05	27.29	2.25	4.51	2.43	< LOD	4.97
LS-4A	ppm	5.04	1.69	41.47	2.55	313.4	4.23	< LOD	4.87	18.7	1.77	5.18	2.12	< LOD	4.23
18-18-1	ppm	3.57	1.88	357.07	4.53	359.4	4.3	< LOD	6.02	88.73	2.88	8.53	2.34	< LOD	5

LT-1	ppm	4.04	1.63	104.92	3.06	456.2	4.72	< LOD	5.72	72.25	2.6	< LOD	3.04	< LOD	4.73
CP-b	ppm	3.31	1.65	< LOD	2.08	24.72	1.44	< LOD	3.7	4.12	1.24	4.02	1.99	< LOD	4.09
LS-LA Sales	ppm	7.12	1.72	26.34	2.47	333.9	4.42	< LOD	4.84	20.27	1.8	4.06	2.12	< LOD	4.51
CP-a	ppm	< LOD	2.51	128.28	3.29	447.8	4.78	7.98	4.08	80.07	2.79	10.43	2.41	< LOD	5.2
18-18 z	ppm	< LOD	2.62	137.21	3.39	373.3	4.54	14.3	4.47	97.38	3.15	11.51	2.56	< LOD	5.45
LS-A-1	ppm	4.35	1.69	125.89	3.44	602	5.51	< LOD	5.8	48.8	2.34	4.24	2.11	< LOD	4.14

Tabla 6. 16 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Au, Se, As, Hg, Zn, y W).

SAMPLE	Units	Au	Au Error	Se	Se Error	As	As Error	Hg	Hg Error	Zn	Zn Error	W	W Error
LT-3	ppm	< LOD	4.32	< LOD	2.05	< LOD	3.33	< LOD	7.61	46.43	4.87	< LOD	20.11
LT-4	ppm	< LOD	5.6	< LOD	2.61	< LOD	3.86	< LOD	8.95	24.59	4.81	< LOD	23.89
LS-4A	ppm	< LOD	5.53	< LOD	2.7	< LOD	3.38	< LOD	9.76	10.15	4.36	52.9	17.52
18-18-1	ppm	< LOD	4.96	< LOD	2.4	< LOD	3.8	< LOD	8.36	40.35	5.09	< LOD	22.25
LT-1	ppm	< LOD	4.69	< LOD	2.2	< LOD	3.49	< LOD	7.96	40.83	4.93	< LOD	21.11
CP-b	ppm	< LOD	5.63	< LOD	2.78	< LOD	3.14	< LOD	10.16	7.63	4.32	39.3	17.76
LS-LA Sales	ppm	< LOD	5.57	< LOD	2.72	< LOD	3.44	< LOD	9.78	14.99	4.56	32.1	17.35
CP-a	ppm	< LOD	4.88	< LOD	2.35	< LOD	3.95	< LOD	8.25	50.61	5.45	< LOD	21.89
18-18 z	ppm	< LOD	5.37	< LOD	2.62	5.59	2.86	< LOD	9.04	62.23	6.01	< LOD	23.58
LS-A-1	ppm	< LOD	4.87	< LOD	2.35	< LOD	3.08	< LOD	8.31	24.68	4.58	25	14.94

Tabla 6. 17 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (Cu, Ni, Co, Fe, Mn y Cr).

SAMPLE	Units	Cu	Cu Error	Ni	Ni Error	Co	Co Error	Fe	Fe Error	Mn	Mn Error	Cr	Cr Error
LT-3	ppm	< LOD	10.04	< LOD	14.48	< LOD	22.18	11170	95.6	123	26.06	659.1	17.01
LT-4	ppm	20	8.69	< LOD	18.09	< LOD	18.6	5834	79.08	442.2	36.17	< LOD	15.23
LS-4A	ppm	< LOD	12.85	30.13	12.28	15.55	8.21	1854	46.38	78.62	27.51	210.6	9.1
18-18-1	ppm	14.83	7.93	< LOD	16.99	< LOD	23.83	11182	102.81	214.3	30.39	433.6	15.08
LT-1	ppm	< LOD	10.71	< LOD	16.22	22.85	14.97	10192	96.21	192.8	29.59	925.4	19.25
CP-b	ppm	< LOD	13.23	< LOD	18.49	< LOD	7.49	130	19.82	38.95	25.66	141.2	7.32
LS-LA Sales	ppm	< LOD	12.93	23.78	12.4	< LOD	12.35	2025	49.36	430.4	36.09	89.8	7.9
CP-a	ppm	< LOD	11.75	< LOD	17.07	36.93	19.5	17126	126.72	286.5	31.73	193.1	14.87
18-18 z	ppm	23.47	8.56	55.92	12.61	63.87	20.83	17751	134.08	411.5	36.03	85.69	13.64
LS-A-1	ppm	< LOD	11.26	< LOD	16.8	< LOD	22.21	9577	95.12	174.9	29.41	614.4	16.97

Tabla 6. 18 Tabla de resultados FRX Niton modo suelos elementos (V, Ti, Sc, Ca, K, S).

SAMPL E	Unit s	V	V Error	Ti	Ti Error	Sc	Sc Error	Ca	Ca Error	K	K Error	S	S Error
LT-3	ppm	58.38	13.09	1418.1	41.09	61.82	15.57	13726	117.3	16281	171.11	< LOD	103.65
LT-4	ppm	32.53	9.1	686.51	31.27	472.55	41.65	96050	304.8	5979.7	116.46	29825.7	494.55
LS-4A	ppm	13.42	5.12	252.51	15.55	91.98	14.68	18606	107.3	1386.5	47.51	11438.5	243.86
18-18-1	ppm	66.95	12.6	1966.9	41.76	109.96	21.88	27115	162.9	12804	156.25	364.39	94.24
LT-1	ppm	40.29	12.76	1216.6	40.03	63.84	15.25	12589	114.4	15927	171.83	< LOD	98.01
CP-b	ppm	6.38	3.52	< LOD	12.56	4.7	2.32	306.73	15.24	399.1	26.98	2439.57	107.52
LS-LA Sales	ppm	13.3	5.15	241.64	15.9	53.29	18.49	29503	138.8	1880	55.6	11581.8	253.31
CP-a	ppm	96.82	15.02	2095.2	49.45	233.95	34.09	51242	251.4	13690	184.44	7611.88	292.8
18-18 z	ppm	86.78	16.14	2703.1	54.64	189.12	31.64	43760	234.7	17372	206.73	3210.75	206.28

LS-A-1	ppm	61	13.8 1	1359. 3	42.9 9	78.98	17.6 7	1759 3	131. 1	1181 3	148.7	< LOD	104.4 6
---------------	-----	----	-----------	------------	-----------	-------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------	-------	------------

Basándonos en los reportes de la calidad de cuarzo que se mencionó en capítulos anteriores para la industria de la sílice, el tamaño de la arena para las muestras LT-1 y LT-3 muestran un rango de distribución de 0.5mm a 1 mm considerando el tamaño adecuado para su procesamiento, además mediante su estudio estadístico, nos indica que están bien clasificadas, por el contrario la muestra LS-1-A se concentra a tamaños mayores a 1 mm, en este caso no se tomaría en cuenta para sus especificaciones de calidad. Estas arenas también cumplen con el estándar del tamaño de grano permitido para la utilización de fracking. La especificación para esta industria requiere granulometría comprendida de 0.833 mm-1.39 mm.

Cabe mencionar que, para la industria del vidrio, los cuarzos de las arenas LT-1 son de forma angulosa y no redondeada, ya que esta última favorece la generación de burbujas imposibles de eliminar, mientras que los granos angulosos funden en masas mucho más homogéneas (figura 1.5).

Se obtuvo valores de SiO₂ máximas de 93.8% en las arenas de granito LT-1, y en LT-3 con un máximo de 91.1% valores óptimos para su uso industrial en la fabricación de vidrio, además las cantidades tolerables de impurezas de óxido de hierro y titanio son mínimas y se aceptan para la fabricación de vidrio ámbar o de botella, (Tabla 6.14). Parte contraria a las arenas LS-1-A que contenía en menos proporción cuarzo, que a su vez estaba mezclado con mucha plagioclasa y biotitas, dando un valor de SiO₂ de 65%.

En este caso el método SWIR nos confirmó la presencia de minerales arcillosos (algunos que forman parte del grupo de las esmectitas) como Montmorinollita, Illita, Nontronita, y algunos sulfatos como Thenardita presentes en muestras de arcillas, todo esto asociado a hidrotermalismo de la zona. También SWIR detecto Microclina e incluso Natrolita, éste último mineral del grupo de las zeolitas.

Cabe destacar que el método analítico SWIR asocia la firma espectral de la muestra con el software correlacionando esos datos de longitud de onda y reflectancia, a su librería de espectros, aquí es donde juega un papel importante el adecuado criterio geológico para discernir entre que minerales asocia el software y si realmente se trata del mineral en cuestión.

La muestra de arcilla CP-a, llamo la atención especialmente por los picos característicos que muestra la gráfica de la figura 6.17. muy parecidos visualmente a la firma espectral de Hectorita (Figura 6.14), un mineral del grupo de las esmectitas con contenido de **Litio**. Esto debido a que presenta dos picos de inflexión muy bajos con valores cercanos a 1500 nm y 2000 nm (Figura 6.17).

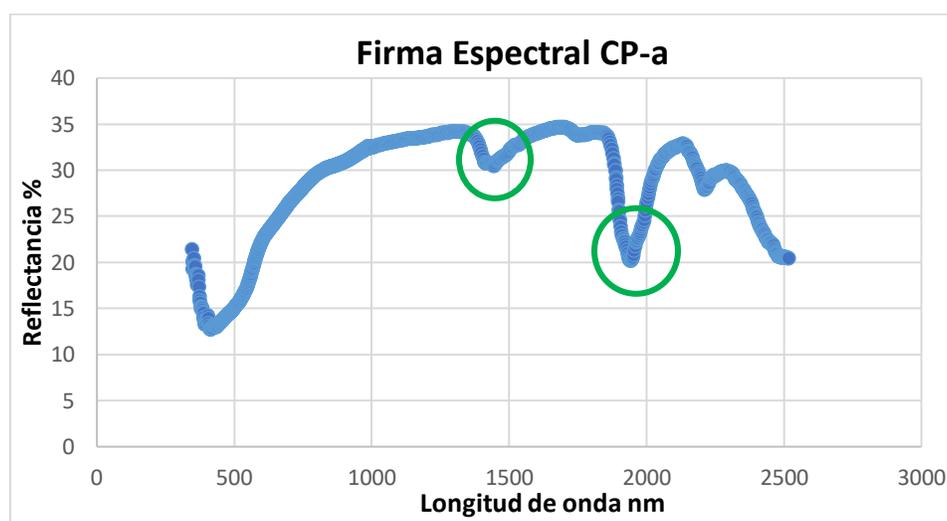


Figura 6. 17. Representación gráfica de la firma espectral, mostrando en el eje de las abscisas longitud de onda en nanómetros, y en el eje de las ordenadas reflectancia % de la muestra CP-a. Datos numéricos proporcionados por el software Spectral Evolution.

Analizando el espectro podemos utilizar criterios basándonos en el manual para la identificación de minerales SWIR SPECTRAL Volume 1 del año 1996 (Tabla 6.13).

En la figura 6.18 en la gráfica los puntos de inflexión importantes comenzando por el hombro o Shoulder: 916 nm, el cual no pertenece o se encuentra dentro del rango de (1374 nm-1396 nm), el largo de Hectorita se encuentra en un rango de (1400 nm-1418nm) y este valor sobrepasa esos límites de longitud de onda.

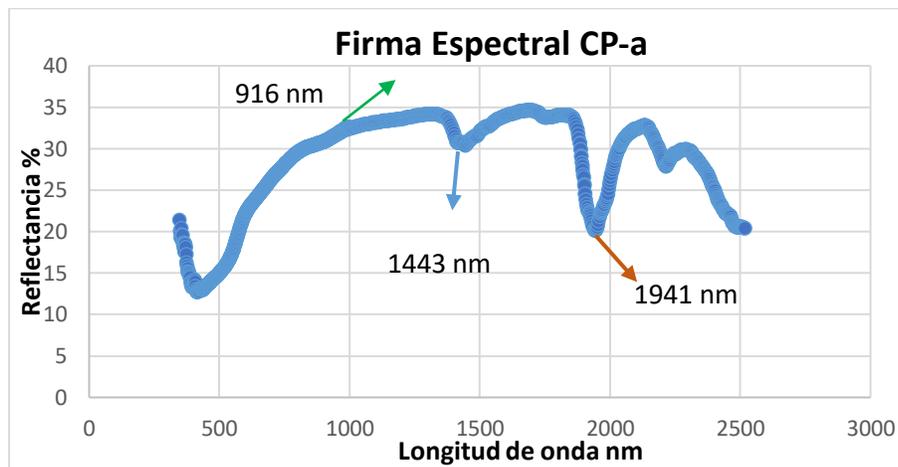


Figura 6. 18 Espectro de la muestra CP-a con diferentes longitudes de onda.

Posiblemente sea una arcilla del grupo de las esmectitas, pero con bajo o nula concentración de Litio para compararse con el espectro de Hectorita.

Consultando reportes internos de Cerro Prieto, se menciona que el enriquecimiento de litio aumenta progresivamente hacia el NW de la zona, esto por procesos hidrotermales por el campo geotérmico Cerro Prieto, mientras que hacia la parte sur decrece su concentración.

● **6.2 Conclusiones y recomendaciones**

El método SWIR, es una herramienta bastante útil en la exploración, y básicamente ayuda a detectar ciertos minerales, más que nada minerales de alteración hidrotermal, pero en búsqueda de Litio el espectro no es tan certero y puede confundirse fácilmente con otro mineral que tenga ciertos patrones similares respecto a sus longitudes de onda.

Las arenas de la zona cumplen con ciertos estándares físicos y químicos que permitirían el beneficio de las arenas en cuanto a la industria del vidrio y para uso de fracking.

En la zona de estudio se tiene enriquecimiento de litio, fallas activas, hidrotermalismo, zona de alto flujo de calor, y posibles rocas volcánicas enriquecidas con Litio, sin embargo se necesita de otros métodos de exploración para la búsqueda del Litio, ya que la Fluorescencia de Rayos X tiene una

limitante, el Litio al ser un elemento con número atómico 3, es imposible que la fluorescencia detecte su presencia por ser un elemento con pocos electrones. Por el contrario para el análisis de las arenas nos ayudó mucho a comparar la calidad de sílice para su uso industrial.

Recomiendo hacer un muestreo a detalle y utilizar una buena técnica geoquímica que sea capaz de detectar litio ya sea en arcillas o evaporitas como ICP-MS.

● **Bibliografía**

Aceñolaza, F., Toselli, A. y González, O. 1976. Geología de la región comprendida entre el salar del Hombre Muerto y Antofagasta de la Sierra, provincia de Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 31 (2): 127- 136.

Ahlfeld, F 1972. Geología de Bolivia. Editorial “Los amigos del libro”, La Paz ,190 pags.

Allen, P.A y Allen J.R. 1990. Basin analysis: Principles and applications. Blackwell Scientific Publication, Oxford. 549 pp.

Alonso, R. N. y Gutiérrez, R. 1986. Litoestratigrafía del Neógeno terminal, Puna sudoriental argentina. Revista del Instituto de Geología y Minería de Jujuy, Universidad Nacional de Jujuy, 6: 29-47, Jujuy

Alonso, H.; Risacher, F. 1996. Geoquímica del salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. SERNAGEOMIN, Revista geológica de Chile, vol. 23 n°2, 113-122 p. Santiago, Chile.

Alonso, H.; Risacher, F. 1996. Geoquímica del salar de Atacama, parte 2: evolución de las aguas. SERNAGEOMIN, Revista geológica de Chile vol. 23 n°2, 12-134 p. Santiago, Chile.

Álvarez R, J. et al. (Julio-Diciembre 2012). Características geológicas preliminares de la nueva zona termal Cucapah en el Valle de Mexicali, BC, México. Revista Mexicana de Geotermia, 25, 27.

Aramayo, C. 1986. Geología y petrología del borde NE del salar del Hombre Muerto (provincia de Catamarca). Tesis Profesional Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (inédita), 122 p., Salta.

Asher-Bolinder, S., 1991, Descriptive model of lithium in smectites of closed basins, in G. J. Orris, and J. D. Bliss, eds., Some Industrial Mineral Deposit Models: Descriptive Deposit Models, United States Geological Survey Open Report 91-11A, p. 53-54.

Atwater, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. Geol. Soc. Am. Bull.

Ballivian O, Risacher, F. 1981. Los Salares del Altiplano Boliviano. Métodos de Estudio y Estimación económica. Universidad Mayor de San Andrés. París

Barnard, F.L., 1968. Structural Geology of the Sierra de los Cucapas, northeastern Baja California, Mexico. Faculty of Graduate School of the University of Colorado, Boulder, Colorado, Doctoral Thesis.

Benes, V y Davy P. 1996, Modes of continental lithospheric extensión: experimental verification of strain localization process: Tectonophysics, v.254.69-87pp.

Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284p

Bradley, Dwight, Munk, LeeAnn, Jochens, Hillary, Hynek, Scott, and Labay, Keith, 2013, A preliminary deposit model for lithium brines: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013

British Geological Survey. 2009 British Geological Survey Annual Report 2008-09. Nottingham, UK, British Geological Survey, 88pp. (Annual Reports of the British Geological Survey).

Buck, W.R. 1991. Models of continental lithospheric extensión, journal of geophysical research V, 96,20161-20178 pp.

(CeMIEGeo) Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (2020, Marzo 26)
<https://cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>

Contreras-Pérez, J., Ramírez-Zerpa, N., Negrete-Aranda, R.,2012, Modelos tectonoestratigráficos de las cuencas de Tiburón y Wagner en el norte del Golfo de California: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 29, núm. 1

Cruz-Castillo, Manuel. 2002.Catalogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. Unión Geofísica Mexicana, abril,2002.

CRU Limited,2018. Arenas Silíceas. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. Informe ejecutivo CRU 2018

De la Hoz, Mauro.2013. El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares. Instituto de Bio y Geociencias del NOA, UNSa-CONICET e Instituto de Geociencias – Universidad de Brasilia 2 Universidad Nacional de Salta.

De Silva, S.; Francis, P.W. 1991. Volcanoes of the Central Andes. Springer-Verlag, 216 p. Berlin.

Dutrow, B.2018. X-ray Powder Diffraction (XRD), Geochemical Instrumentation and Analysis, Louisiana State University,2018.

Duran, J.2016. TESIS: Estratigrafía regional y significado tectónico del grupo Comondú en Baja California Sur, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Centro de Geociencias

Emsley, J 2001. Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Element, Oxford University Press,2001.

Evans, R. K., 2014, Lithium (Chapter 10), in A. G. Gunn, ed., Critical Metals Handbook Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd.

Folk, R.L., 1980. Sedimentary petrology, 3 ed. Hemphill publ. 220 p. Folk, R.L., 1967. Carbonate sediments of Isla Mujeres, Quintana Roo, Mexico and vicinity in Yucatan Field Trip Guidebook Annual Meeting, Geol. Soc. of America, 100- 123 pp.

Gallego, M. 1992. TESIS: Las mineralizaciones de Litio asociadas a magmatismo ácido en extremadura y su encuadre en la zona Centro-Ibérica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.

García Abdeslem, J; Espinosa, JM; Munguía Orozco, L; Wong Ortega, V & Ramírez, J. 2001 Crustal structure from 2-D gravity and magnetic data modeling, magnetic power spectrum inversion, and seismotectonics in the Laguna Salada basin, northern Baja California, México Geofísica Internacional, vol.40, núm. 2, 2001, pp. 67-85 Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México

Gastil, G.R., R.P. Phillips and E.C. Allison, 1975. Reconnaissance geology of state of Baja California. Geol. Soc. of Amer., Memoir 140. 170 p.

González, O. 1983. Geología, alteración hidrotermal y edad del Cerro Tebenquicho, Departamento Antofagasta de la Sierra, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 38: 49-59.

Hiner, J. 2017. NI 43-101 Technical Report on the Atacama Lithium Project, Region 2 of Chile. Wealth Minerals Ltd. March 10,2017.

Jordan, T., Alonso, R., y Godfrey L. 1999. Tectónica, subsidencia y aguas en el salar Hombre Muerto, Puna argentina. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 254-256, Salta.

Kesler, S. E., P. W. Gruber, P. A. Medina, G. A. Keoleian, M. P. Everson, and T. J. Wallington, 2012, Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits: *Ore Geology Reviews*, v. 48, p. 55-69

Kunasz, I.A., 1974, Lithium occurrence in the brines of Clayton Valley Esmeralda County, Nevada, in Coogan, A.H., ed., *Fourth International Symposium on Salt*, Houston, Tex., April 8–12, 1973, Proceedings: Cleveland, Northern Ohio Geological Society, p. 57–65.

Kunasz, I., 2006, Lithium Resources, in J. E. Kogel, N. C. Trivedi, J. M. Barker, and S. T. Krukowski, eds., *Industrial Minerals and Rocks*, SME (Soc. Mining Metallurgy and Exploration), p. 599-614.

Mariaca, C,J,J,1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del lago Poopo y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Tesis de grado,La Paz,Bolivia 203p.

Miranda, C. (2009) “Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio”,Comisión Chilena de Cobre. Camilo Lagos Miranda.

http://www.cochilco.cl/productos/pdf/2009/informe_minerales_estrategicos_litio.pdf

Metalary (2019, Diciembre 30). Retrieved from <https://www.metalary.com/lithium-price>

Morán, D. J. (1985). *Geología de la República Mexicana*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 1985.

Mueller, K.J, and T.K. Rockwell, 1995. Late Quaternary activity of the Laguna Salada Fault in northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 107, pp. 8-18.

Nieva, D. & Prol-Ledesma, Rosa María & Romo-Jones, José. (2013). *La geotermia en el futuro energético sustentable de México*.

Niton, T. F. S. (2010). *Manual-XL3-Series-v7.0.11. User's Guide, Version 7*.(November).

LITIO, la paradoja de la abundancia. s.f Informe preliminar de la Red de Asistencia Jurídica contra la Megaminería.

Legg, M.R., 1991. Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. in: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 179-196.

Legg, M.R., Wong, V. and Suárez, F., 1991. Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California, in: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-177

Lesage, Ph. y Frez, J., 1990. Estudio comparativo de las fuentes de los temblores de Victoria, junio 9, 1980, del Valle Imperial, octubre 15, 1979 y de El Golfo, agosto 7, 1966. Geofísica Internacional, v. 29, No. 3, p. 149-169.

Ley de Transición Energética, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México, 2015.

Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California. The Geology of North America, The Eastern Pacific Ocean and Hawaii (pp. 499-521). Boulder, Colo.: Geological Society of America.

López, Pedro L., Auqué, Luis F., Garcés, Ingrid, & Chong, Guillermo. (1999). Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile. Revista geológica de Chile, 26(1), 89-108.

Oldow, J.S., Elias, E.A., Ferranti, L., McClelland, W.C., and McIntosh, W.C., 2009, Late Miocene to Pliocene synextensional deposition in fault-bounded basins within the upper plate of the western Silver Peak–Lone Mountain extensional complex, west-central Nevada, in Oldow, J.S., and Cashman, P.H, eds., Late Cenozoic structure and evolution of the Great Basin–Sierra Nevada transition: Boulder, Colo., The Geological Society of America, Special Papers 2009. <http://specialpapers.gsapubs.org/content/447/v.full.pdf+html>)

Olympus, 2016. Exploración de Litio en pegmatitas. Fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (XRD) de Olympus en modo portátil para la exploración de litio en yacimientos de pegmatita de tipo LCT (litio, cesio y tántalo).

One World Lithium Project Salar del Diablo. (2020, mayo 28). <https://oneworldlithium.com/projects/>

Perfil de Mercado de Litio, 2018. Dirección General de Desarrollo Minero. Secretaria de Economía. Diciembre 2018.

Perfil de mercado de Silice, 2021. Dirección General de Desarrollo Minero. Secretaria de Economía. Diciembre 2021.

Ramírez, C.; Gardeweg, M. 1982. Hoja Toconao, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 54, 122 P.

Retano, B. (2017, Enero 22). El Financiero. <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/sonora-entrara-a-negocio-de-autos-electricos-con-explotacion-de-litio.html2>

Risacher, F. Y Miranda, J., 1976 - Indicios de interés económico en los salares del Sud Lipez. Informe UMSAORSTOM, La Paz, Bolivia.

Risacher, F., Miranda, J. Y Carlo, L., 1976 - Litio y potasio en las borateras de Río Grande. Informe UMSAORSTOM, La Paz, Bolivia, 8 p.

Risacher, F. 1989. Estudio económico del Salar de Uyuni. Institut français de recherche scientifique.

Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C., 2003, The origin of brines and salts in Chilean salars—A hydrochemical review: Earth-Science Reviews, v. 63, nos. 3–4, p. 249–293

Rebollar, C., Reyes, A. and Reichle, M., 1982. Estudio del enjambre de San Quintín, Baja California, México, ocurrido durante 1975. Geofísica Internacional, v. 21-4, p. 331-358.

Saldarriaga, J. (2018, Julio 18) Descubren 2.5 millones de toneladas de litio en Puno, Minería. Perú: Descubren 2.5 millones de toneladas de litio en Puno | Minería | ECONOMIA | EL COMERCIO PERÚ

Sengör, C. 1995. Sedimentation and tectonics of fossil rifts. En: Busby, C. Ingersoll R. eds, tectonics of sedimentary basins, Oxford England: Blackwell Science, pp.53-117.

Servicio Meteorológico Nacional (2020, Mayo 27). <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=bc>

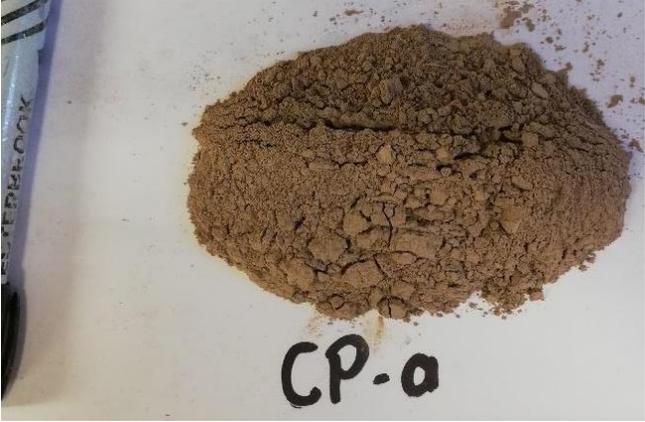
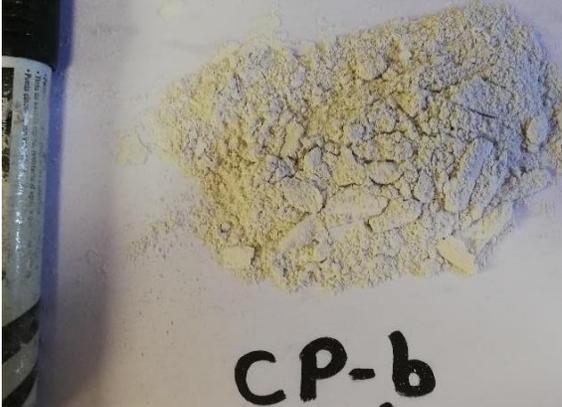
Servicio Geológico Mexicano, 2017. Geotermia. Fecha de publicación: 22 de marzo 2017 https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html

- Siem, M.E., 1992. The Structure and Petrology of Sierra El Mayor, northeastern Baja California, Mexico. San Diego State University, Master Thesis.
- Servicio Geológico Mexicano (2018), Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2017, México, SGM.
- Stanley, C. J., 2007, Jadarite, $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$, a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia: European Journal of Mineralogy, v. 19, p. 575-580.
- Stock, J.M and K.V. Hodges, 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf California and the transfer of Baja California the Pacific Plate. Tectonics, 8, pp. 99-115.
- U.S. Geological Survey, 2017, Mineral commodity summaries 2017, pp: 100-101
- U.S. Geological Survey (2018), Mineral Commodity Summaries, Estados Unidos, USGS
- Thierry, C. 2011, Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 7, p. 227–266
- Turner, J.C. 1972. Puna. En Leanza, A.F. (ed.) Academia Nacional de Ciencias, Primer Simposio de Geología Regional Argentina: 91-116, Córdoba.
- Trueman, D. & Cerny, P. (1982). 'Exploration for rare-element pegmatites'. Min. Ass. Canadá ShortCour. Handboot pp.463-491
- Vázquez S., 1996. Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia sedimentaria al oriente de Laguna Salada, Baja California. Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, División Ciencias de la Tierra.
- Vinante, D & Alonso R. (2006) Evapofacies del salar Hombre Muerto, Puna Argentina: Distribución y Génesis. Revista de la Asociación Geológica Argentina 61 (2): 286-297
- Warren, J. 2017. Lithium in saline geosystems: Lake brine and clays.
- Viewweather Clima Salar del Muerto Argentina (20 may,2020)
<https://weather.com/esUS/tiempo/10dias/1/9a65a8e4bd92bc35e0b80bc45577464418353034bd2b1d7b1929822af7619674>
- Zientek, M. L., and G. J. Orris, 2005, Geology and Nonfuel Mineral Deposits of the United States: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1294-A.

- ANEXOS

ANEXO 1. Fotografía de las muestras por zona

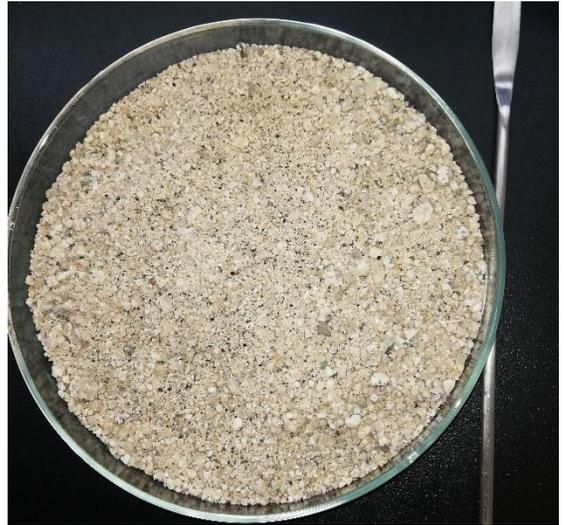
MUESTRAS

<p>Zona 1 Evaporitas o Arcillas</p>	<p>Zona 2 Arenas Sílicas</p>
<p>CP-a</p>  <p>CP-a</p>	<p>LT-1</p>  <p>LT-1</p>
<p>CP-b</p>  <p>CP-b</p>	<p>LT-3</p>  <p>LT-3</p>

18-18-1



LS-A-1



LT-4



LS-L-A



Anexo 2. Tabla de pesos obtenidos para cada muestra por separación granulométrica de tamiz.

Datos para la muestra LT-1

Muestra LT-1		Peso Total	
		152.8 grs	
# Tamiz	Abertura (mm)	φ	Peso (grs)
8	2.38	-1.25	19.9
10	1.68	-0.74	5.6
12	1.41	-0.49	13
14	1.19	-0.25	14.5
16	1	0	14.6
20	0.85	0.23	26.4
60	0.25	2	40.4
100	0.15	2.7	2.3
140	0.106	3.23	0.8
200	0.075	3.73	0.7
325	0.041	4.47	0.8
-325 (fondo)	----- --	---	0.7

Datos de la muestra LT-3

Muestra LT-3		Peso Total	
		265.5	
# Tamiz	Abertura (mm)	φ	Peso (grs)
8	2.38	-1.25	24.6
10	1.68	-0.74	11.2
12	1.41	-0.49	18.1
14	1.19	-0.25	15.7
16	1	0	12.1
20	0.85	0.23	42.8
60	0.25	2	111.2
100	0.15	2.7	9.6
140	0.106	3.23	2.5
200	0.075	3.73	1.6
325	0.041	4.47	1.5
-325 (fondo)	----- --	----	1.2

Datos de la muestra LS-1-A

Muestra LS-1-A		Peso Total	
		177.7 grs	
# Tamiz	Abertura (mm)	φ	Peso (grs)
8	2.38	-1.25	33.7
10	1.68	-0.74	7
12	1.41	-0.49	9.2
14	1.19	-0.25	6.8
16	1	0	4.2
20	0.85	0.23	11
60	0.25	2	44
100	0.15	2.7	29.8
140	0.106	3.23	10.9
200	0.075	3.73	9
325	0.041	4.47	7.7
-325 (fondo)	-----	-----	3.6