



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Elaboración de una base de  
datos para integrar una  
colección de rocas ígneas de  
México**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Francisco Javier García Maldonado

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Dr. Enrique Alejandro González Torres



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

El presente trabajo se realizó en el marco del Proyecto de Apoyo para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) con clave PE104015: “Mejoramiento de la enseñanza de la Petrología Ígnea a través de la integración de una colección de rocas de la Faja Volcánica Trans-mexicana que introduzca a los alumnos al conocimiento de la Geología de México”.

## ÍNDICE

Resumen .....	4
Abstract.....	4
1. Introducción.....	6
1.1 Objetivo general .....	6
1.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Antecedentes.....	6
1.4 Problemática .....	7
1.5 Justificación.....	8
2. Importancia del registro de rocas ígneas de México .....	9
2.1 Clasificación de rocas ígneas.....	9
2.2 Provincias magmáticas de la República Mexicana .....	12
2.2.1 Faja Volcánica Transmexicana.....	15
2.2.2 Sierra Madre Occidental.....	22
2.2.3 Provincia del Arco Comondú .....	26
2.2.4 Provincia de la Sierra Madre del Sur.....	29
3. Material didáctico para el apoyo a la docencia.....	30
3.1 Material didáctico .....	31
3.2 Metodología y desarrollo de la base de datos.....	31
3.3 Manual del usuario .....	38
3.4 Herramientas utilizadas durante la elaboración del proyecto .....	44
3.5 Representación de base de datos .....	45
4. Conclusiones.....	46
5. Bibliografía.....	48

## **RESUMEN**

Los procesos de enseñanza-aprendizaje han cambiado con el paso de los años, por lo que cada vez con más frecuencia se incluyen nuevas herramientas y metodologías que buscan hacer más eficaz el aprendizaje al vincular diferentes áreas del conocimiento. En la actualidad las herramientas computacionales han tomado un papel fundamental en el estudio de las ciencias geológicas con el desarrollo de aplicaciones y sistemas de información geográfica que permiten almacenar grandes volúmenes de información geológica y conocer su ubicación espacial, lo cual permite facilitar el proceso de síntesis, análisis e interpretación de la información, así como su difusión, lo cual impacta en forma significativa los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Este trabajo contribuye en proporcionar a los alumnos una base de datos de rocas ígneas de la Faja Volcánica Trans-mexicana, en la que dispongan de información sistematizada de la ubicación de las muestras, la estructuras volcánicas que les dio origen, descripciones macroscópicas y petrográficas, como son texturas y mineralogía, así como información de la química de elementos mayores y traza que permitan a los estudiantes tener un conocimiento más integral de las mismas, además de poder realizar algunas inferencias petrogenéticas y del contexto tectónico de su formación. La base de datos Colección de rocas ígneas de México es un material didáctico para aprender la petrología ígnea de manera más integral y que seguramente en un futuro se le incorporará mayor información que favorecerá a varias asignaturas de la carrera Ingeniería Geológica.

## **ABSTRACT**

The teaching-learning processes have changed over the years, so more and more new tools and methodologies are included that seek to make learning more effective by linking different areas of knowledge. Nowadays, computational tools have taken a fundamental role in the study of geological sciences with the development of applications and geographic information systems that allow to store large volumes of geological information and know their spatial location, which facilitates the synthesis process, analysis and interpretation of information, as well as its dissemination, which significantly impacts the teaching-learning processes.

This work contributes in providing the students with a database of igneous rocks of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in which they have systematized information on the location of the samples, the volcanic structures that gave rise to them, macroscopic and petrographic descriptions, such as textures and mineralogy, as well as information on the chemistry of major elements and trace that allow students to have a more comprehensive knowledge of them, as well as being able to make some petrogenetic inferences and the tectonic context of their formation. The Igneous Rock Collection of Mexico database is a didactic material to learn the igneous petrology in a more comprehensive way and that surely in the future will be incorporated more information that will favor several subjects of the Geological Engineering career.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Objetivo general**

Este trabajo tiene el objetivo desarrollar una herramienta para contribuir a mejorar la enseñanza de la asignatura de Petrología Ígnea, a través de la elaboración de una base de datos que integre la información de una colección de rocas ígneas.

### **1.2 Objetivos específicos**

1. Reconocer la información geológica que deberá contener la base de datos y la mejor forma de mostrarla.
2. Diseñar y elaborar la estructura de la base de datos que permita integrar la información de una colección de rocas ígneas.
3. Elaborar un manual de uso y una memoria que permita en un futuro realizar las modificaciones necesarias para su mejora.

### **1.3 Antecedentes**

El presente trabajo es parte de un Proyecto de Apoyo para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) con clave PE104015 del cual el Dr. Enrique Alejandro González Torres es responsable. Estos proyectos buscan mejorar la enseñanza de una forma creativa, que promuevan nuevas formas de aprendizaje a través de motivar el interés, la imaginación de los estudiantes y la posibilidad de vincular ciertas áreas del conocimiento con otros campos para propiciar una enseñanza multidisciplinaria. Un referente que contribuye a mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje es conocer los sitios con que cuentan las Universidades en los cuales se integra y organiza información diversa sobre la geología de su país, con el fin de facilitar el aprendizaje a los estudiantes.

Las tecnologías de la información están transformando los procesos de enseñanza y el aprendizaje. México destaca como país con más sitios web registrados en Moddle como plataforma educativa enfocándose en la flexibilidad y el aprendizaje en línea (Moddle,

disponible en <https://moodle.net/stats/?lang=es>). En el caso de la geología, dichas tecnologías deben promover un conocimiento más detallado de las muestras de minerales y rocas de las colecciones resguardadas en los laboratorios; no obstante, se reconoce que el trabajo de campo sigue siendo la pieza medular del estudio geológico (González-Torres, E., 2004). Ejemplos sobre el tema de la aplicación de estas herramientas virtuales; por citar algunas, son el Atlas de rocas ígneas de la Universidad Complutense de Madrid (disponible en <https://petroigne.wordpress.com/>) y Petrología ígnea de la Universidad de Granada (disponible en <http://www.ugr.es/~petgquim/P1web.html>).

En la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (DICT) de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se han desarrollado también plataformas que contribuyen a la enseñanza de las ciencias geológicas como son Geocampo digital (Silva et al.; disponible en <http://cartografia.fi-a.unam.mx/>) que contiene información sobre colecciones de rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas, fósiles, geomorfología, entre otros. Así mismo se cuenta con la plataforma Rocas metamórficas (Victoria y Amparo; disponible en <http://metamorficapapime.wix.com/rocasmetamorficas>) que muestra la colección de rocas metamórficas de diferentes localidades de la República Mexicana.

#### **1.4 Problemática**

Como alumno de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el estudiante cursaba la asignatura Petrología ígnea, el laboratorio destinado a la enseñanza, y se percataba que varias muestras carecían de información sobre su procedencia, situación que no permite vincular a las muestras con un contexto geológico, en muchos casos no se cuenta con láminas delgadas de las muestras de roca, y viceversa, se cuenta con láminas que no tienen muestras de mano, si a lo anterior se suma que se desconoce la descripción de afloramientos y la información de análisis geoquímicos de las muestras, las prácticas de laboratorio son limitadas, y no permiten aplicar varios de los conceptos que se enseñan en la teoría. Esa experiencia ha permitido reconocer la problemática que alumno tiene, en la integración de la información en un contexto geológico. Identificar minerales y textura de la muestra de mano, estudiar de la forma de los cristales y/o su alteración post-magmática a través de fotomicrografías bajo

el microscopio petrográfico, clasificación química de la roca y cómo todos estos se relacionan con su forma de emplazamiento en superficie y su posición con respecto a un marco tectónico regional.

Disponer de la información citada, facilitaría a los estudiantes el realizar observaciones, descripciones, clasificaciones e interpretaciones como parte de un proceso de enseñanza integrado. Las observaciones se complementan al realizar una descripción de afloramiento, muestra de mano, lámina delgada y diagramas de clasificación química. La interpretación consiste en dar significado a lo que se observa con el fin de ubicarlo correctamente en su contexto espacial, temporal y su relación con otros elementos geológicos. Es importante considerar de manera conjunta los análisis geoquímicos, la petrografía y la información de campo, que permitan a los estudiantes contar con mayores elementos para comprender el contexto de origen de las rocas ígneas, así como tener otros elementos para interpretar el significado de las rocas más allá de su clasificación petrográfica.

### **1.5 Justificación**

Durante varios años, el laboratorio de petrología de la DICT en la Facultad de Ingeniería, la enseñanza de la asignatura Petrología Ígnea se ha visto limitada por la carencia de una colección sistematizada de muestras de rocas y láminas delgadas, de las cuales se conozca su procedencia, así como de un medio que integre la información sobre las descripciones macroscópicas y microscópicas de las muestras de roca que se utilizan en el laboratorio.

A través de esta colección sistematizada, se pretende facilitar el aprendizaje de la asignatura, al proporcionar especial atención al reconocimiento de estructuras, texturas, composición mineral e información geoquímica a través de un portal virtual de fácil acceso mediante el cual los alumnos podrán visualizar la información de manera conjunta.

Al tener la información en forma conjunta, el alumno podrá integrar las observaciones microscópicas con la información de los diagramas de clasificación química y ubicarlos en su contexto geológico. Además permitirá al alumno contestar preguntas sobre el significado de la información de las rocas y su vínculo con los procesos que les han dado origen además de relacionar e integrar lo aprendido en distintas asignaturas.



La colección también contribuirá a la enseñanza de asignaturas afines; por ejemplo Geoquímica, ya que se dispone de información de las características geoquímicas de las rocas, así como a los alumnos de la asignatura Geología Física; que dispondrán de ejemplares de rocas ígneas de México. El curso de Geología de México también se beneficiará, ya que los estudiantes al conocer la procedencia de los ejemplares de la colección, dispondrán de elementos para iniciar su conocimiento sobre el tema, ya que les permitirá asociarlos al contexto de la geología de México.

Además de las ventajas señaladas, con esta base de datos en el Laboratorio de Petrología Ígnea se verá beneficiado con la base de datos, al tener un mejor inventario de los materiales, evitando las pérdidas de los mismos y disponer de un inventario que permita documentar la existencia del material, así como las carencias que se tienen en determinados tipos de roca.

## **2. IMPORTANCIA DEL REGISTRO DE ROCAS ÍGNEAS DE MÉXICO**

### **2.1 Clasificación de rocas ígneas**

Uno de los principales objetivos al describir las rocas ígneas, es comprender los procesos magmáticos que las originaron, así como las condiciones bajo las cuales estos procesos operaron. Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y cristalización de magmas.. Los magmas son fundidos silicatados formados por material fundido, cristales y gases. Cuando el magma llega a la superficie de la Tierra recibe el nombre de lava (Silva y Mendoza; 2011). Lava es un magma que ha perdido gran cantidad de su contenido en gases.

La composición de una roca ígnea puede ser expresada como:

- 1) Análisis geoquímico cuantitativo. Expresado en porcentaje en masa para cada constituyente químico principal. A partir de esta información se pueden realizar inferencias de la fuente magmática y condiciones (presión, profundidad, grado de fusión) bajo las cuales el fundido original se formó. La base de datos del presente trabajo contiene un archivo Excel con datos resultado de análisis químico que permite al estudiante con las interpretaciones petrogenéticas.
- 2) Una relación de los minerales reconocidos en muestra de mano o bajo el microscopio petrográfico. En una muestra de mano, la textura y ciertos minerales permiten identificar los tipos de roca presentes en un área. La presencia de ciertos minerales clave identificados bajo el microscopio puede ayudar a estimar la composición química del fundido original, la

historia de cristalización y forma de erupción del material. También proporciona información de procesos post-magmáticos como alteración hidrotermal y erosión. En la base de datos se incluye un mapa para ubicar a la roca en su contexto tectónico regional y las estructuras en superficie resultado de su emplazamiento, fotografías de muestra de mano y fotomicrografías para identificar minerales formadores de roca y/o alteraciones.

Para designar nombres a las rocas se ha dividido este espectro en pequeños campos que permiten clasificar a las rocas con base a ciertos criterios como el tamaño de grano de los minerales, índice de color, clasificación química y petrografía (Figura 1). Es importante observar que esta división no existe en la naturaleza porque la variabilidad composicional de las rocas es continua y no discreta. La clasificación por el tamaño de grano se divide en grueso, media y fina y consiste en realizar una estimación cualitativa del tamaño promedio de los granos minerales que componen la roca en conjunto. El contraste en el tamaño de grano refleja una relación entre el tamaño de los cristales minerales y la tasa de enfriamiento del magma. El porcentaje de minerales oscuros es conocido como índice de color y se estima realizando un conteo de minerales en sección delgada. En muestra de mano; una roca que contiene pocos minerales oscuros se clasifica como félsica, por el contrario una roca con abundante minerales oscuros se clasifica como máfica. Petrográficamente se tiene las siguientes categorías: holomelanocrática, melanocrática, mesocrática, leucocrática y hololeucocrática; siendo los primeros los más oscuros. El contenido del % de SiO<sub>2</sub> permite realizar una clasificación química en ultrabásica, básica, intermedia y ácida. Otra clasificación es la presencia de cuarzo (sobresaturada en sílice) o nefelina (subsaturada en sílice).

La nomenclatura de una roca ígnea se realiza mediante un nombre raíz (con base a un sistema de clasificación) con uno o más adjetivos de acuerdo a los minerales que la roca puede contener. Por ejemplo, “basalto de olivino” es una roca de grano fino, color oscuro con fenocristales de olivino. Los minerales que una roca puede contener se pueden dividir en 1) minerales esenciales; son aquellos minerales que determinan el nombre raíz, 2) minerales tipos; minerales que no son necesarios para definir el nombre raíz pero que sí permiten realizar una subdivisión, 3) minerales accesorios; minerales presentes en menor cantidad y 4) minerales postmagmáticos; minerales que se forman una vez terminado los procesos ígneos que le han dado origen a la roca.

La geoquímica estudia la composición y dinámica de los elementos para comprender cómo funciona el planeta, determina la distribución de los elementos, su abundancia y cómo estos se unen para formar minerales. El diagrama TAS, por sus siglas ‘*total-alkalis vs silica*’ es ampliamente usado para realizar una clasificación geoquímica de las rocas, si no es posible identificar los minerales con el microscopio petrográfico (Figura 2). El eje vertical muestra la suma de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O (para minerales alcalinos) y el eje horizontal SiO<sub>2</sub> (para minerales silicatados), ambos expresados en porcentaje en masa. Por el contrario, si los minerales pueden ser identificados se recomienda utilizar el diagrama de clasificación QAPF (Q para

“quartz” en inglés, A para “Alkali feldspar”, P para “Plagioclase” y F para “Feldspathoid”).

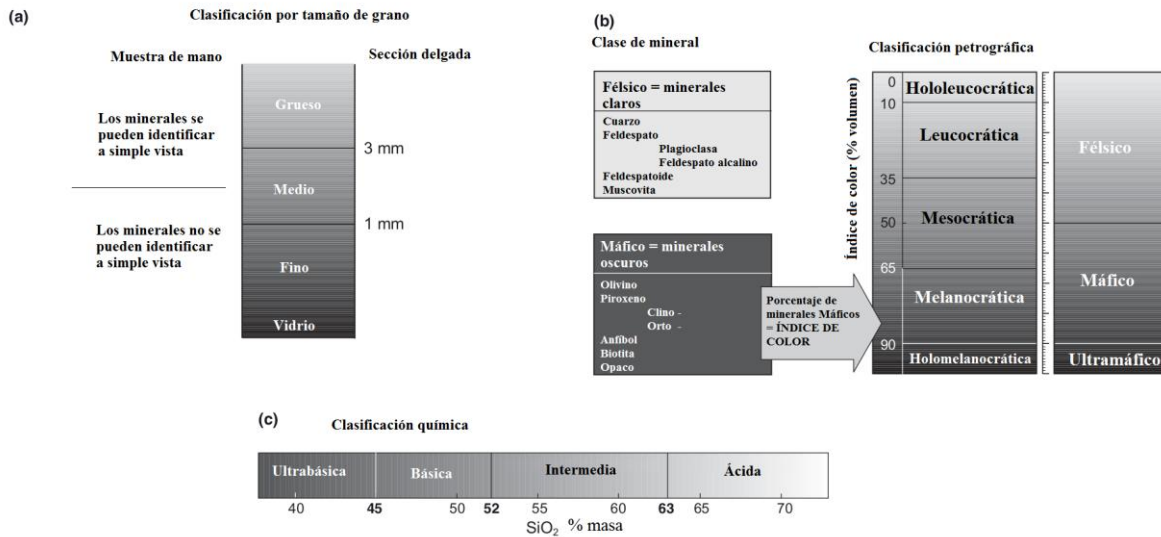


Figura 1. Criterios para clasificar rocas ígneas por a) tamaño de grano, 2) índice de color y 3) clasificación química (Modificado de Gill, R., 2010).

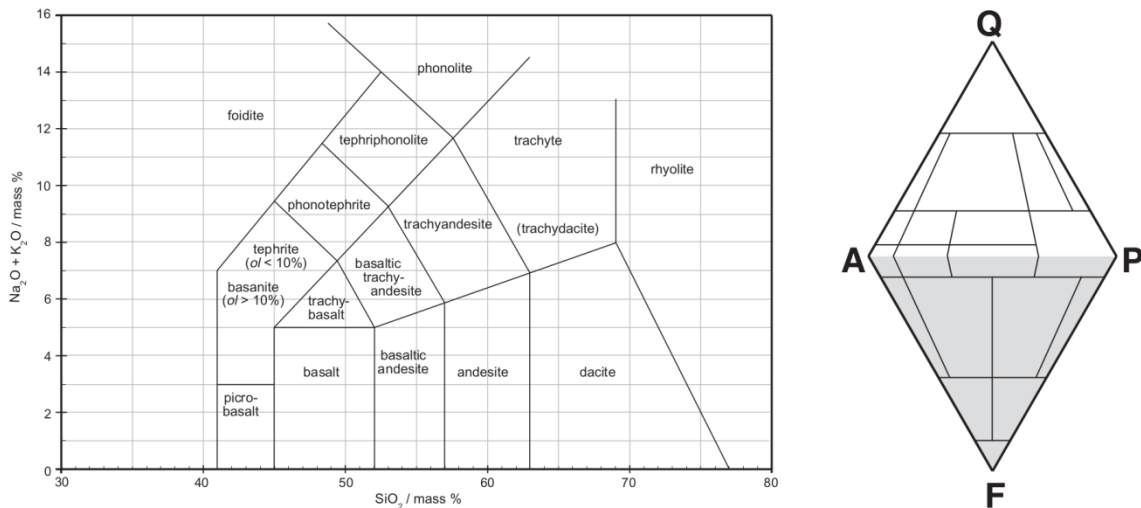


Figura 2. Diagrama TAS (izquierda) y QAPF (derecha) (Modificado de Gill, R., 2010).

Ninguno de los sistemas de clasificación aporta información completa sobre los procesos ígneos y deben complementarse con otros. Por ejemplo, durante el trabajo en campo es difícil establecer una composición química precisa, pero un estudio mineralógico y textural permite realizar una estimación que posteriormente en laboratorio podrá corroborarse.

En la base de datos cada muestra de roca corresponde con una breve descripción de afloramiento, muestra de mano y petrografía acompañadas de fotografías. También se incluye un archivo Excel descargable que contiene datos sobre el análisis geoquímico de la muestra.

## **2.2 Provincias magmáticas de la República Mexicana**

El conocimiento geológico que se tiene de la República Mexicana está aún incompleto; sin embargo, los estudios y publicaciones recientes aportan datos que permiten comprender con mayor detalle el origen de las rocas que integran el registro geológico de México y las diversas estructuras geológicas de México.

En 1896 se publicó la obra “Bosquejo Geológico de México” elaborado por José G. Aguilera, obra que contribuyó de manera significativa al bosquejo de la Carta Geológica de México. Pasaron varios años hasta que en 1956 se publicó la primera edición de la Carta Geológica de la República Mexicana de escala 1:2' 000 000. A partir de esos documentos preliminares que muestran la amplia variedad geológica que cuenta nuestro país se han desarrollado una multitud de estudios sobre el registro de rocas volcánicas en México (Ferrari et al., 2007) (Figura 3).

Las rocas ígneas constituyen gran parte del territorio de la República Mexicana. En la Carta Geológica de la República Mexicana (Ortega-Gutiérrez et al., 1992); de las 76 unidades litológicas 34 unidades son sedimentarias, 9 volcano-sedimentarias, 12 volcánicas, 10 intrusivas y 11 metamórficas. De las 76 unidades 31 se clasifican como rocas ígneas; representado aproximadamente el 40% del territorio mexicano. Ejemplos de lo anterior, son algunas de las estructuras volcánicas activas que se distribuyen a lo largo del territorio de la República Mexicana (Tabla 1).

El registro de las rocas ígneas en México se ha integrado en provincias magmáticas, que agrupan las rocas formadas durante ciertos intervalos de tiempo y asociados a un marco geológico y tectónico regional dominante (Figura 4). La actividad magmática en la República Mexicana está vinculada al sistema de subducción de la margen pacífica desde la porción sur de Baja California hasta Chiapas desde el Mesozoico generando grandes estructuras tectónicas y volcánicas (Ortega-Gutiérrez et al., 2014).

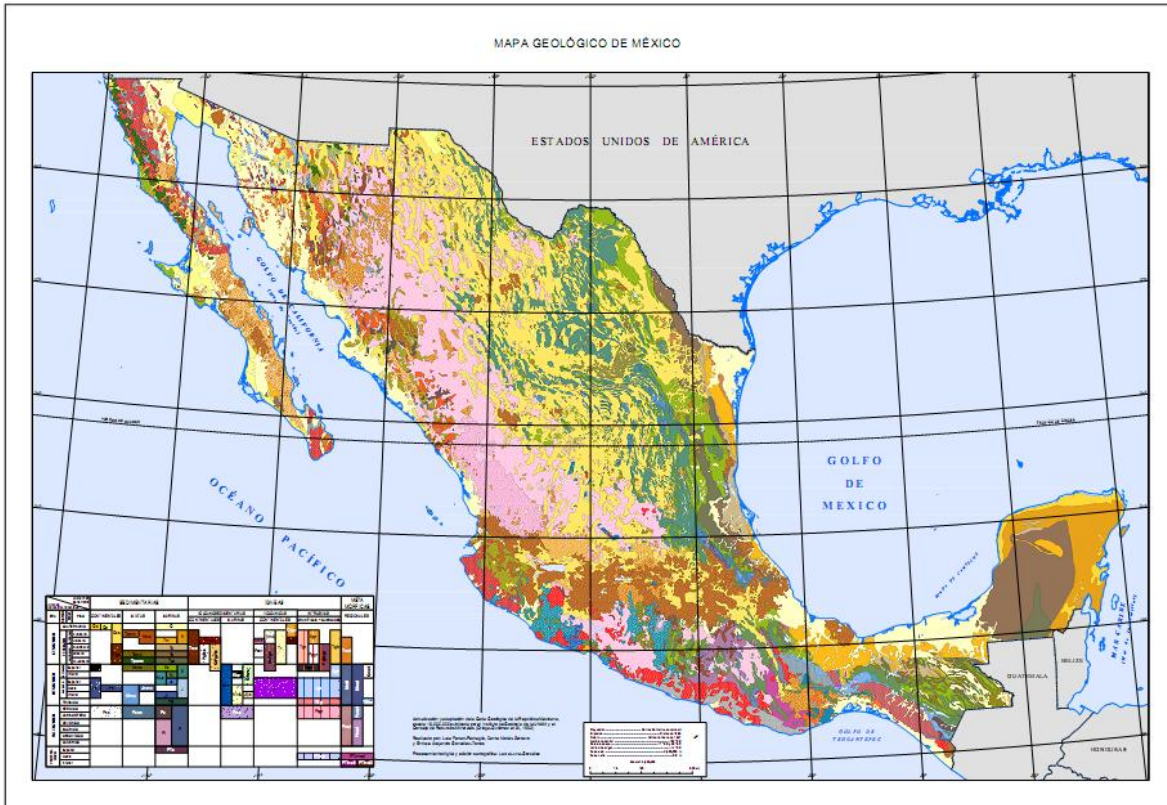


Figura 3. Carta Geológica de la República Mexicana a escala 1:4' 000 000 (Ferrari, L.; Morán, D.; González, E., 2007).

Nombre	Descripción breve
Volcán Xinantécatl o Nevado de Toluca	El Nevado de Toluca es un volcán de edad Pleistoceno Tardío-Holoceno constituido por andesitas y dacitas calcialcalinas. Ha experimentado erupciones tipo Pliniana.
Volcán de Colima	Está emplazada dentro de la caldera del antiguo volcán Paleofuego del Pleistoceno-Holoceno. Es un estratovolcán compuesto por derrames andesíticos, depósitos de flujo piroclástico y de caída.
Volcán Popocatepetl	Es un estratovolcán compuesto por una

	alternancia de depósitos piroclásticos y lavas de composición andesítica. Su formación se inició hace 23 000 años. Ha presentado erupciones plinianas.
Volcán Citlaltepétl o Pico de Orizaba	Es un estratovolcán cuaternario compuesto principalmente de lavas andesíticas y dacíticas.
Volcán el Chichón	Pertenece al arco volcánico Chiapaneco con una edad que va del Plioceno al Reciente. El cráter del volcán es un anillo de domos de composición traquiandesítica.
Volcán Tacaná	Consiste en cuatro estructuras alineadas NE-SW: volcán Chichuj, Tacaná, domos Ardillas y San Rafael. El volcán está compuesto por andesitas de composición calcialcalina
Volcán La Malinche	Es un estratovolcán ubicado en el sector oriental de la FVTM. No tiene un cráter central; está ocupada por una serie de domos de lava. Las rocas se caracterizan por tener una composición química que varía de andesítica a dacítica.

Tabla 1. Principales volcanes activos de la República Mexicana (Macías, J. L., 2005; Castro-Govea y Siebe, 2010).

En la República Mexicana se reconocen 4 principales provincias ígneas: Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Occidental, la Provincia de la Sierra Madre del Sur y Provincia del Arco Comondú (Ferrari et al., 2012). Aunque el proyecto PAPIME citado está centrado en integrar una colección de rocas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), se consideró pertinente realizar una caracterización general de las principales

provincias ígneas del país, aunque en el caso de la FVTM de donde proceden las muestras de la colección, se realiza una descripción con mayor detalle de su geología y evolución.

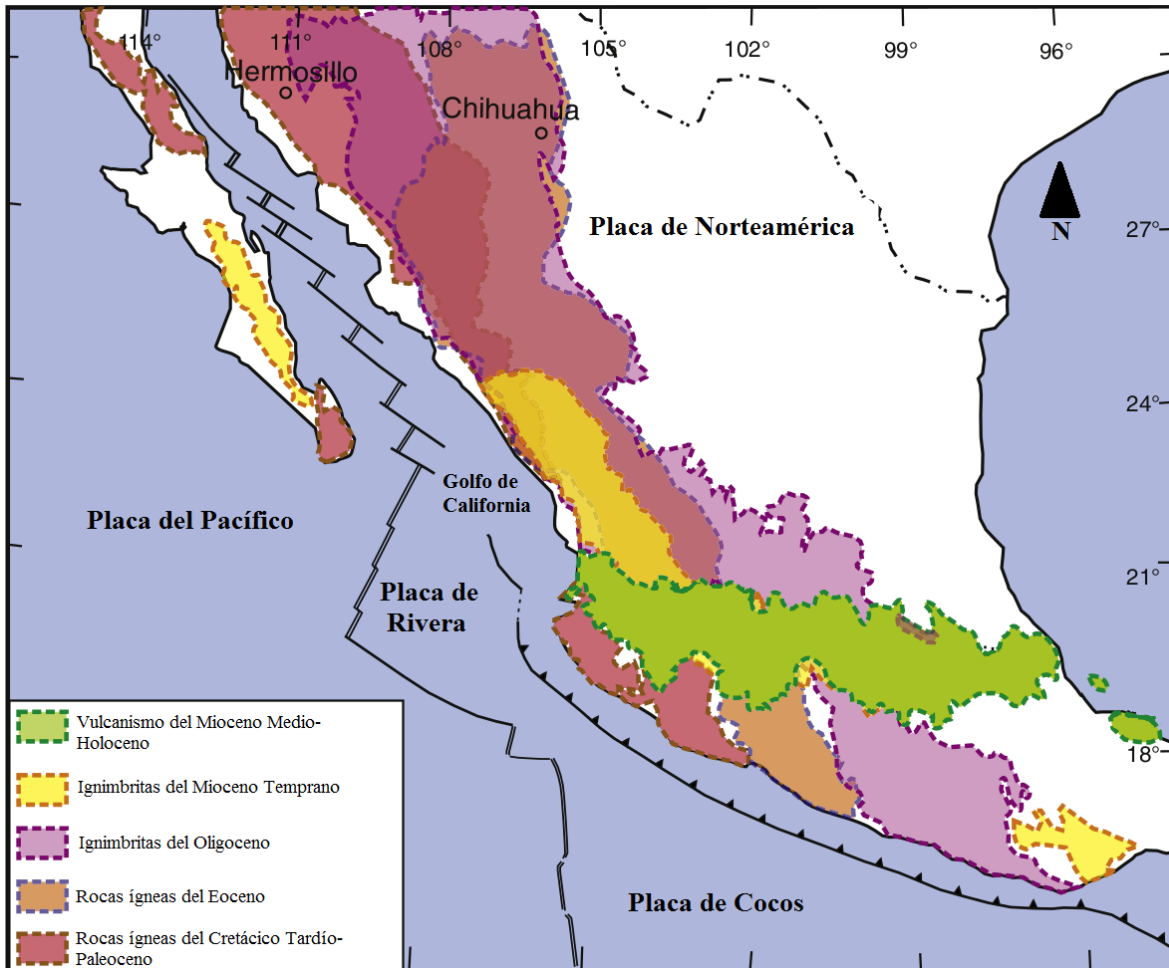


Figura 4. Principales provincias magmáticas continentales de México (Modificado de Ferrari et al., 2012).

### ***2.2.1 Faja Volcánica Transmexicana***

La Faja Volcánica Transmexicana es la región con mayor número de investigaciones geológicas y geofísicas. Su importancia recae en ser una zona geológicamente activa y es donde concentra la mayor población del país (Ferrari et al., 2017). Gómez-Tuena et al. (2005) define la Faja Volcánica Transmexicana como un arco magmático continental, que

se extiende desde las costas del Pacífico, en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Figura 5).

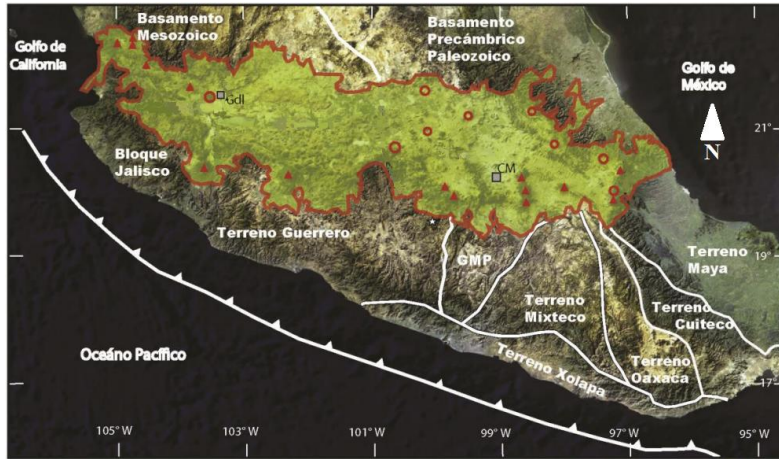


Figura 5. Ubicación geográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (en verde) (Modificado de Ferrari et al., 2012).

El volcanismo cenozoico en México se ha interpretado como el magmatismo de arco en el occidente mexicano que a través del tiempo modificó su geometría y características (Ferrari et al., 1999, Gómez-Tuena et al., 2018, Ferrari et al., 2018) (Figuras 6). Los episodios que preceden la evolución de la FVTM se desarrollan entre 100 y 40 Ma, en el cual ocurre un volcanismo de composición predominantemente intermedia que se extiende hasta el sur de México (Figuras 6a, 6b y 6c). De 40 a 28 Ma es de composición más sílica (Figuras 6d y 6e). De 28 a 5 Ma se desarrolla otro episodio en donde el arco tuvo una rotación de  $\sim 30^\circ$  en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta tocar la paleo-trinchera de Baja California (Figuras 6f, 6g, 6h y 6i), en el cual el volcanismo es más heterogéneo.



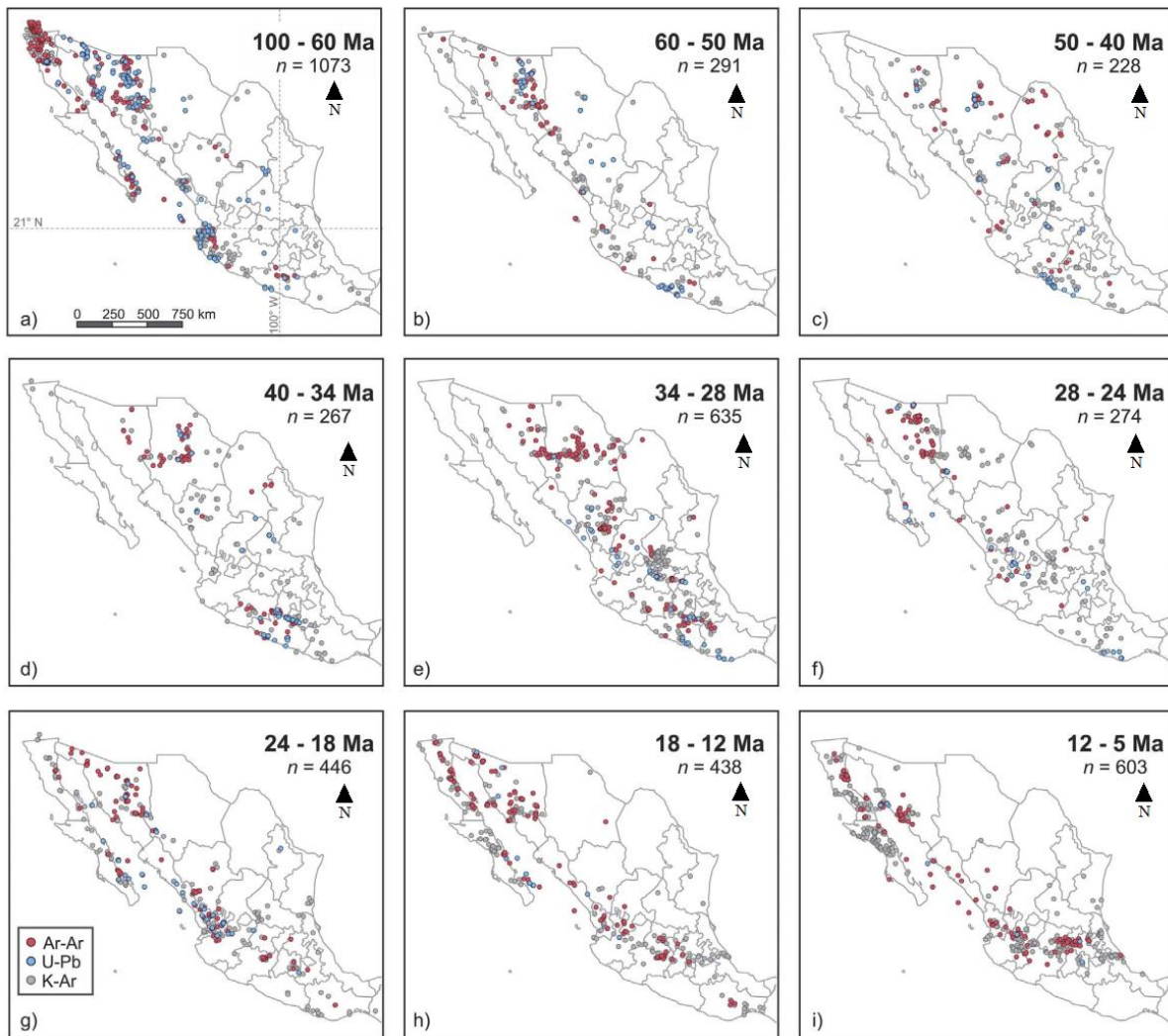


Figura 6. Esquema que muestra la evolución del magmatismo de arco en el occidente de México (Modificado de Ferrari et al., 2018). Los diferentes colores indican el método geocronológico utilizado para obtener la edad de la roca. n es el número de datos incluidos en cada mapa.

La historia geológica de la FVTM se ha dividido en cuatro episodios (Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari et al., 2012) (Figura 7) que se describen a continuación.

1) Instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno Temprano y Tardío con orientación E-W en el centro de México. Durante este episodio se forma el grupo de estratovolcánes Palo Huérfino, La Joya y Zamorano en Querétaro-Guanajuato y el volcán Cerro Grande en Puebla (Figura 7a). 2) Un episodio máfico del Mioceno Tardío-Plioceno Temprano que abarca un área desde Nayarit hasta Veracruz justo al norte del arco

previamente desarrollado cuyas edades se vuelven más jóvenes de oeste a este (Figura 7b). 3) El magmatismo migra hacia el sur con un episodio bimodal en el Plioceno Temprano caracterizado por la formación de las calderas de Amealco, Amazcala, Huichapan, Los Azufres, Zitácuro y Los Agustinos con una migración del pulso magmático hacia el oriente (Figura 7c). 4) La presencia de un arco de composición variable desde el Plioceno Tardío-Cuaternario. En este episodio se forman los volcanes monogenéticos Mascota, Los Volcanes, San Sebastián y Atenguillo. En la porción central, en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato se forman los volcanes Jorullo y Paricutín. Al occidente de la Ciudad de México se forma la Sierra de las Cruces, al sur la Sierra de Chichinautzin y al oriente la Sierra Nevada constituida por el complejo volcánico Iztaccíhuatl y el volcán Popocatepetl. Más al oriente se forman el Pico de Orizaba y Cofre de Perote (Figura 7d). Varios estratovolcanes están alineados dentro de estructura tectónicas regionales (Tabla 1) (Gómez-Tuena et al., 2018).

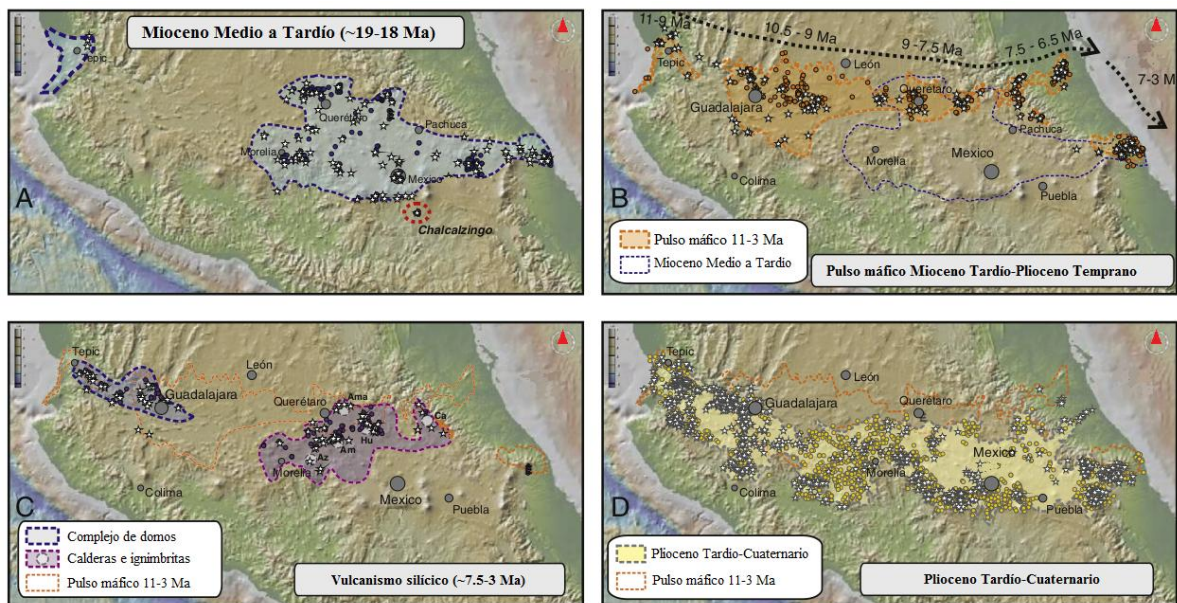


Figura 7. Los cuatro episodios magmáticos de la Faja Volcánica Transmexicana. (Modificado de Ferrari et al., 2012).

Los pulsos de actividad se muestran claramente en el gráfico de la Figura 8 (Ferrari et al., 1999; 2018). Observando los mínimos relativos de la gráfica con los pulsos magmáticos descritos previamente, se tendría periodos máximos de actividad magmática en 35, 25, 15,

7 y 3 Ma aproximadamente, sugiriendo periodos de actividad con duración de 10 Ma. Asimismo, se observan las variaciones en la composición química. Entre 35 y 15 Ma la composición es predominantemente silícica, mientras que a partir de los ~15 Ma la composición es más heterogénea y predominantemente máfica-intermedia, que es el rasgo que contrasta la Sierra Madre Occidental de la FVTM.

El magmatismo de la FVTM ha sido asociado al proceso de subducción de las placas de Cocos y de Rivera que se introducen hacia el manto por debajo del continente (Figura 9). Varios investigadores coinciden en afirmar que la placa de Rivera es más joven y subduce a menor velocidad con un ángulo de ~50° alcanzando 140 km debajo del frente volcánico activo; mientras que la placa de Cocos tiende a ser más horizontal en los primeros 280 km desde la trinchera para después tener una inclinación de ~70°. Esta configuración podría explicar la oblicuidad del arco magmático y su lejanía con respecto a la trinchera (Gomez-Tuena et al., 2018). La corteza continental al occidental de la FVTM es relativamente delgada; en la parte central se incrementa el grosor y más al este vuelve a ser delgada.

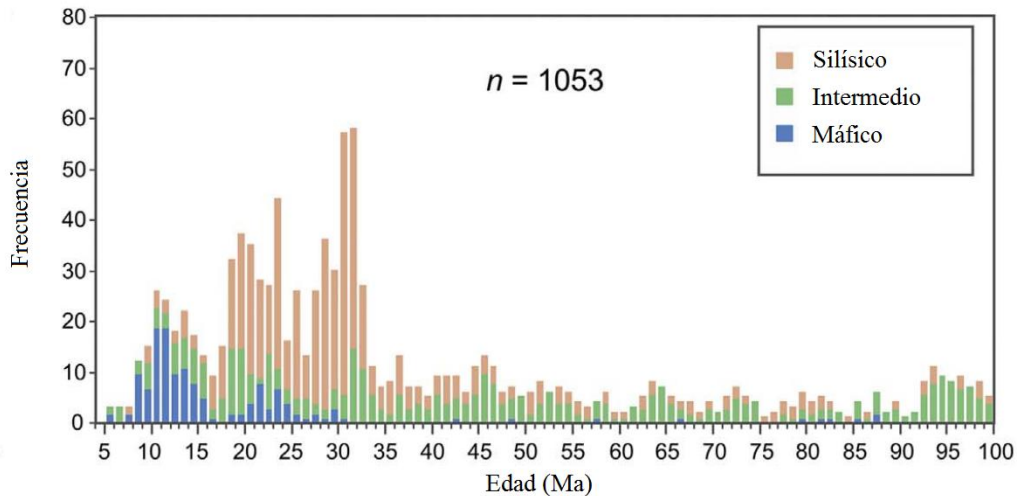


Figura 8. Evolución de la composición magmática en el occidente de México por intervalos de 1 Ma (Modificado de Ferrari et al., 2018). n es el número de datos en el diagrama.

El basamento cristalino sobre el que se encuentra edificada la FVTM corresponde a extensiones geográficas de los terrenos que afloran en el sur de México: terreno Guerrero, Mixteco y Oaxaquia. Gran parte del área sobre el que se encuentra la FVTM está cubierta

por rocas volcánicas y sedimentarias, por lo que la extensión de dichos basamentos en algunos casos se desconoce de forma precisa.

La FVTM está caracterizada por tener una amplia diversidad geoquímica (Gómez-Tuena et al., 2005; 2018). La Figura 10 muestra que las rocas subalcalinas son claramente dominantes. Las rocas alcalinas tienden a concentrarse hacia los extremos occidental y oriental del arco, mientras que las subalcalinas se distribuyen de manera más uniforme a todo lo largo de la FVTM. Si bien es cierto que los datos reportados no son necesariamente representativos de la diversidad geoquímica de toda la FVTM debido a que ciertas zonas han recibido mayor atención que otras. Las rocas que integran la colección proceden de diferentes localidades de la FVTM intentan representar la mayor parte de los episodios durante los cuales se ha ido formando la FVTM. La colección tiene muestras desde la margen pacífica hasta el Golfo de México que varían en composición, textura, contenido en minerales y formas de emplazamiento para que el estudiante pueda tener una idea más amplia sobre la evolución espacio-temporal de la FVTM.

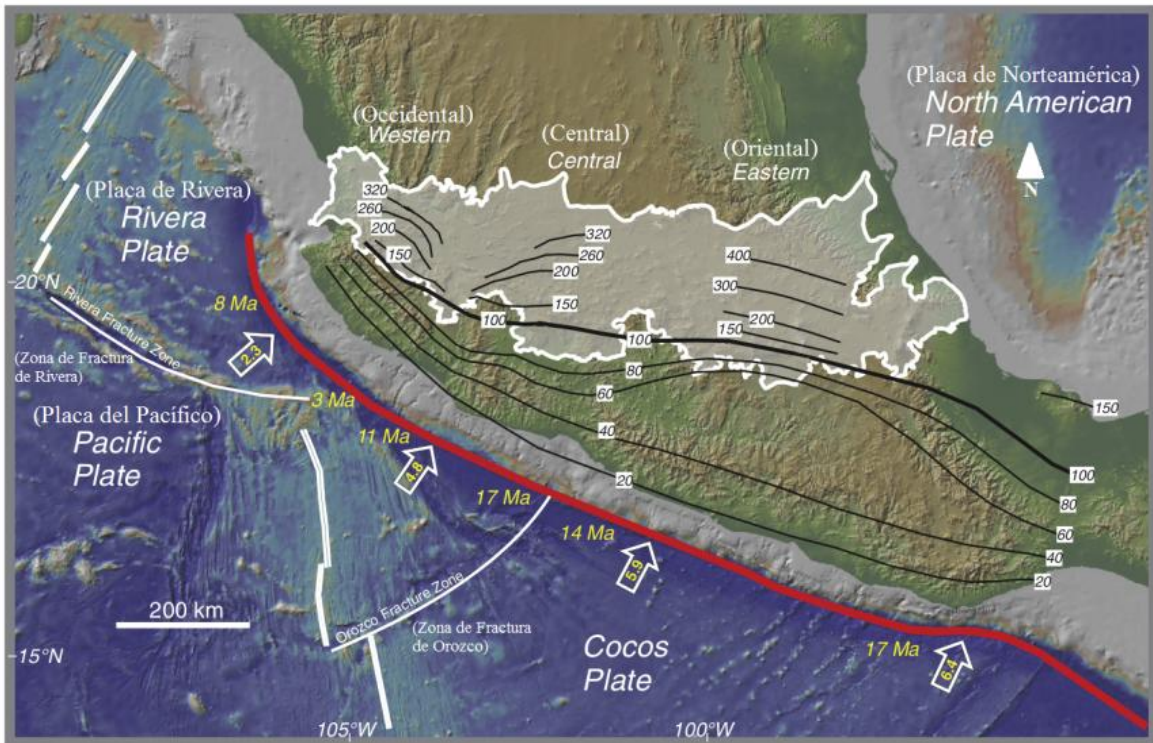


Figura 9. Mapa tectónico del sistema de subducción Mexicano (Modificado de Gómez-Tuena et al., 2018). Los números indican la edad (en Ma) y la velocidad de convergencia enmarcados en flechas (en cm/año). Las curvas de nivel representan la profundidad de la placa oceánica.

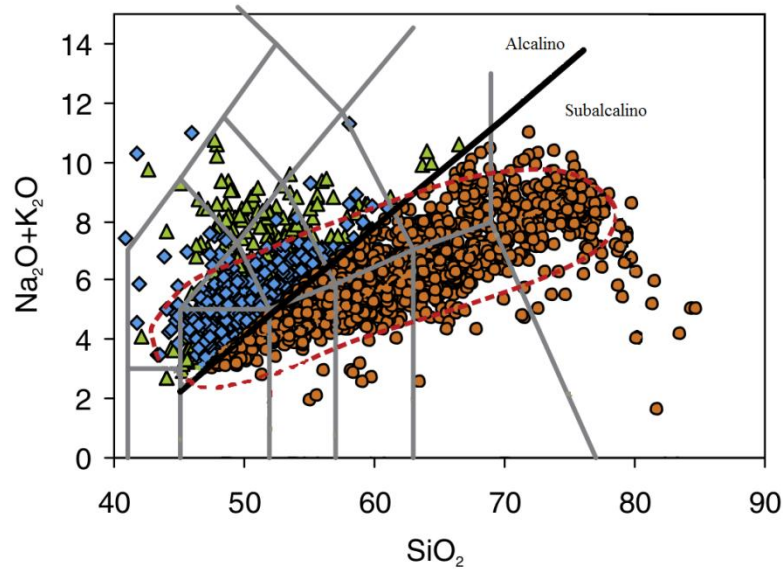


Figura 10. Composición química de las rocas volcánicas de la Faja Volcánica Transmexicana. Diagrama de clasificación basado en el contenido de álcalis totales vs sílice (Modificado de Gómez-Tuena et al., 2018). Se incluye la línea que divide los campos de las rocas alcalinas y subalcalinas.

### **2.2.2 Sierra Madre Occidental**

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una de las provincias ígneas silíceas más grandes del mundo y la más grande del Cenozoico. Se define a la SMO como la provincia fisiográfica del occidente de México, caracterizada por un altiplano con una elevación promedio de más de 2000 m, y aproximadamente 1200 km de largo por 200-400 km de ancho, la cual se extiende desde la frontera con los Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana y limitada al oeste por el Golfo de California y al este por el Altiplano Central (Figura 11); siendo una de las mayores provincias silíceas del planeta. La evolución de la Sierra Madre Occidental está fuertemente relacionada con la historia de subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica (Ferrari et al., 2005; 2018).

Los episodios magmáticos asociados a la SMO de acuerdo a Ferrari et al. (2005), son: 1) rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno, 2) rocas volcánicas andesíticas del Eoceno, 3) ignimbritas silíceas y coladas basáltico-andesítico del Oligoceno

Temprano y Mioceno Temprano y 4) coladas de basaltos e ignimbritas alcalinos del Mioceno Tardío, Plioceno y Cuaternario.

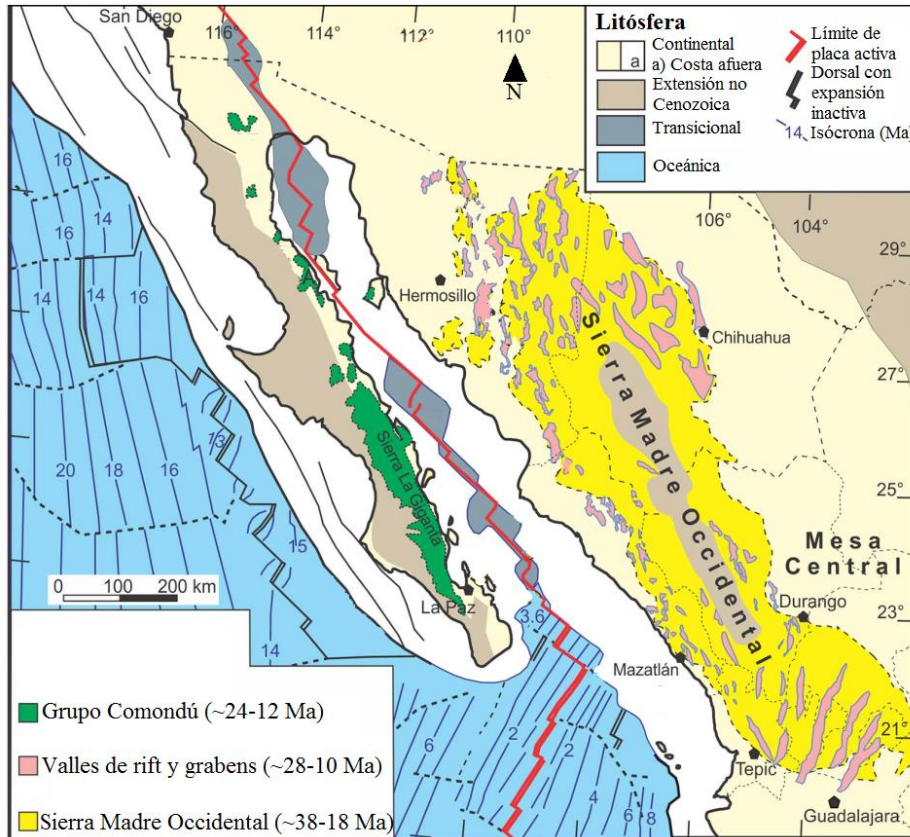


Figura 11. Mapa geotectónico que muestra los diferentes tipos de litósfera, la Sierra Madre Occidental y sus principales cuencas extensionales y la distribución del Grupo Comondú (Modificado de Ferrari et al., 2018).

La SMO ha sido afectada por una deformación extensional que ha afectado principalmente los flancos este y oeste, pero que no afecta al núcleo de la SMO (Figura 12). Un estudio sobre la distribución de las edades con respecto a su distancia de la trinchera muestra una migración del magmatismo entre 140 y 40 Ma hacia el interior del continente, seguido por un regreso hacia la costa entre 40 y 10 Ma (Figura 13). El inicio de la extensión cortical de la SMO está asociado al regreso del arco hacia la trinchera.

En relación a la composición química Ferrari et al. (2005, 2018) muestran un análisis de las rocas del norte y oeste de la SMO (Figura 14), los datos indican un carácter bimodal en la

distribución composicional de las rocas. Se observa una población félsica (riodacitas y riolitas) y otra más intermedia-máfica (andesitas, andesitas basálticas y basaltos). Los datos muestran que valores intermedios son escasos. La relación sílice-álcalis total, indica que la población de rocas subalcalinas es superior a las alcalinas.

Actualmente existen modelos que intenta explicar los grandes volúmenes de magma silícico, sin embargo, ninguna es aceptada completamente por la comunidad científica. Pero se cree que independientemente del mecanismo responsable debe estar relacionado con el arribo de grandes cantidades de magmas máficos.

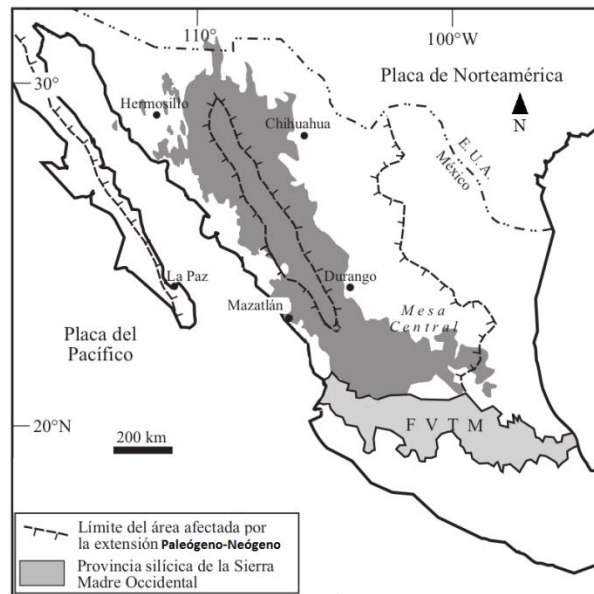


Figura 12. Mapa tectónico de los diferentes sectores de la SMO (Modificado de Ferrari et al., 2005).



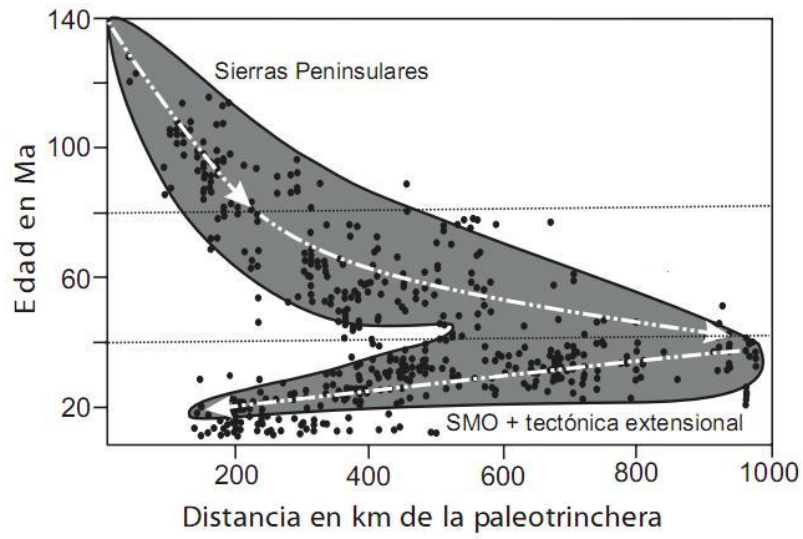


Figura 13. Distribución de la edades de las rocas magmáticas del suroeste de América del Norte graficadas a partir de 140 Ma, en función a la distancia de emplazamiento a partir de la paleotrinchera (Modificado de Valencia-Moreno et. al., 2011).

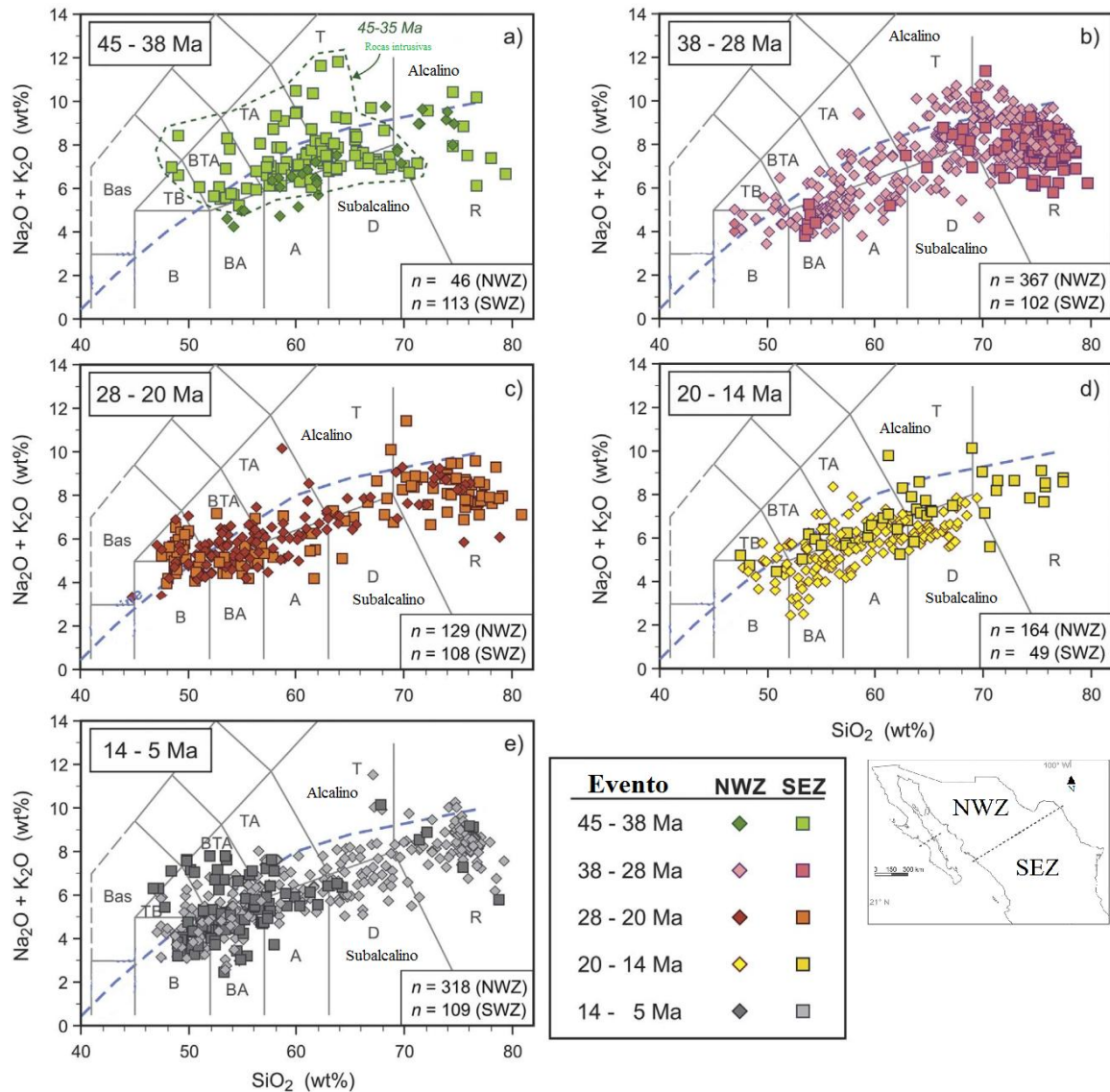


Figura 14. Diagrama de variación de sílice contra álcalis total (TAS) (Modificado de Ferrari et al., 2018). Para cada gráfica los datos se encuentran divididos en la zona noroeste (NWZ) y la zona sureste (SEZ). B: basalto; BA: basalto andesítico; A: andesita; D: dacita; R: riolita; TB: traquibasalto; BTA: traquiandesita basáltico; TA: traquiandesita; T: traquita. n es el número de datos.

### 2.2.3 Provincia del Arco Comondú

La Sierra de la Giganta, ubicada en Baja California, está constituida por una imponente secuencia de rocas piroclásticas, derrames lávicos y areniscas continentales (Bryan et al., 2013, Martín-Barajas, 2000) (Figura 15).

La evolución composicional a través del tiempo está fuertemente influenciada por la apertura del Golfo de California (Figura 16). A partir de los ~18 Ma, que corresponde con el volcanismo del Arco Comondú, el volcanismo silíceo se ve remplazado por rocas de composición predominantemente basálto-adesítico. A partir de los ~12.5 Ma ocurre una súbita manifestación de rocas riolíticas con una duración de al menos 1 Ma. El volcanismo basáltico vuelve a ser dominante a ~10 Ma con una casi extinción del volcanismo riolítico. Durante la apertura del Golfo de California se presenta un volcanismo de composición variable aunque después de un periodo de tiempo el volcanismo vuelve a ser predominantemente riolítico. La apertura del Golfo de California inició aproximadamente después del volcanismo andesítico conocido como Arco Comondú hace aproximadamente 6 Ma con una velocidad anómala de 6-10 ma.

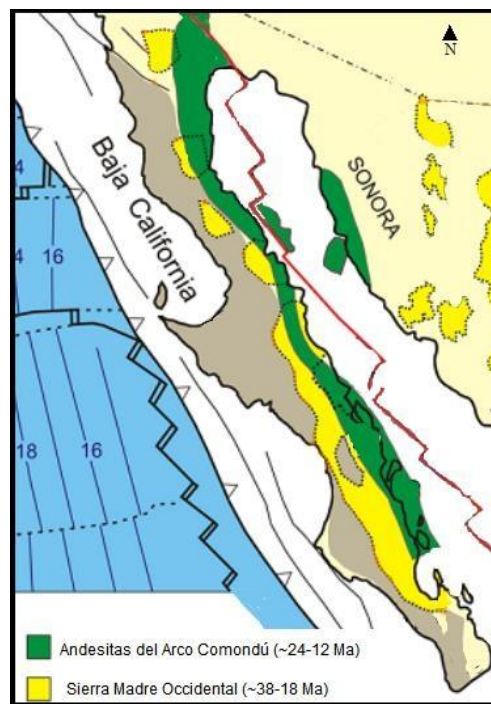


Figura 15. Geología del noroeste de México. Extensión de la Sierra Madre Occidental y el Arco Comondú (Modificado de Bryan S.E. et al., 2013).

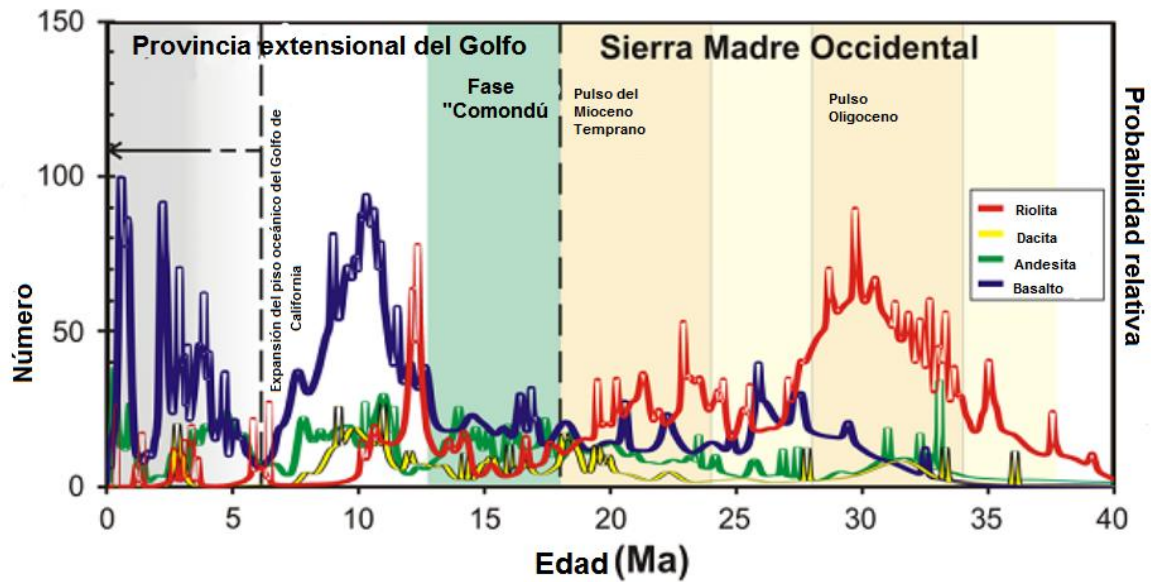


Figura 16. Gráfico de densidad de probabilidad de las edades de rocas ígneas para el noroeste de México para el periodo 40- 0 Ma. Diagrama basado en 1496 edades radiométricas (Modificado de Bryan S. E. et al., 2013).

En cuanto a la composición química, la Figura 17 muestra que durante en el Oligoceno la composición dominante es silícica, mientras que el Mioceno Temprano la composición es más uniforme. En el Mioceno Medio las rocas muestran una composición predominantemente andesítica. La relación sílice-álcalis total, indica que la población de rocas subalcalinas es superior a las alcalinas.

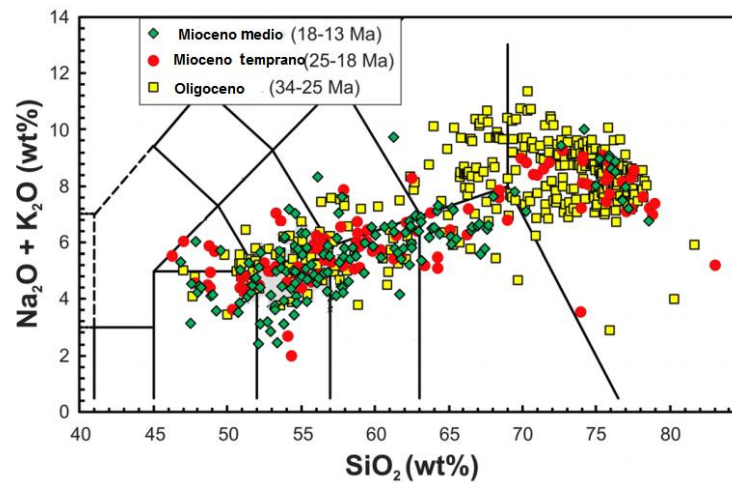


Figura 17. Diagrama de variación de sílice contra álcalis total (TAS) para el Oligoceno-Mioceno en el Noroeste de México. El diagrama contiene 606 análisis (Modificado de Bryan S.E. et al., 2013).

#### 2.2.4 Provincia de la Sierra Madre del Sur

En la Sierra Madre del Sur (SMS) se reconoce un arco volcánico del Paleógeno ubicado al sur de la Faja Volcánica Transmexicana (Morán Zenteno et al., 2005). El basamento de la Sierra Madre del Sur consiste de un mosaico de terrenos tectonoestratigráficos precenozoicos: terreno Guerrero, Mixteco, Oaxaca, Juárez, Xolapa y Maya, los cuales están constituidos por conjuntos de rocas de diferentes edades y litologías (Ferrari et al., 2014; Morán-Zenteno et al., 2018) (Figura 18).

La margen continental del sur de México está compuesta por dos cinturones con orientación WNW. 1) Una serie de centros volcánicos de lava cuyas composiciones varían de máfica a riolítica, así también ignimbritas silíceas y 2) una cadena de batolitos predominantemente silíceo a lo largo de la margen continental (Mori et al.; 2011). En general, la edad de las rocas a lo largo de la margen continental presenta una migración hacia el sureste (Ferrari et al.; 2014) (Figura 19).

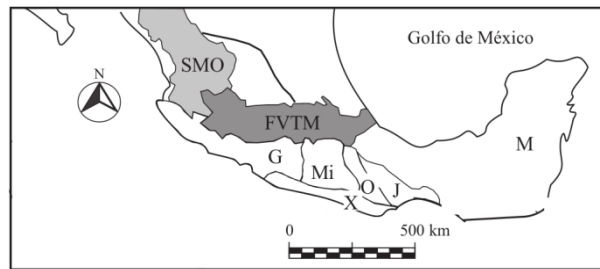


Figura 18. Rasgos tectónicos en el sur de México. También se ilustra la distribución de los terrenos tectonoestratigráficos pre-cenozoicos. SMO, Sierra Madre Occidental; FVTM, Faja Volcánica Transmexicana; G, terreno Guerrero; Mi, terreno Mixteco; O, Terreno Oaxaca; J, terreno Juárez; X, terreno Xolapa (Modificado de Morán-Zenteno et al, 2005; 2007).

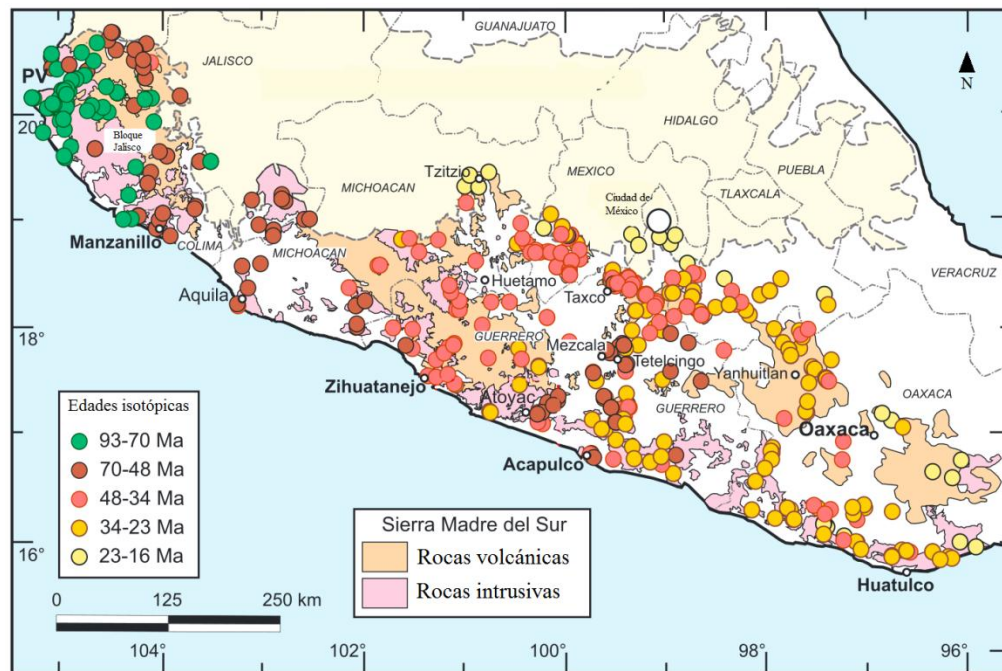


Figura 19. Mapa de la margen Pacífica Mexicana. Se muestra la distribución de las edades de roca y la migración del magmatismo hacia el sureste de la provincia Sierra Madre del Sur (SMS) (Modificado de Ferrari et al., 2014).

### 3. MATERIAL DIDÁCTICO PARA EL APOYO A LA DOCENCIA

Las Tecnologías de Información están transformando los procesos de enseñanza y el aprendizaje porque: enfatizan el control del sistema de enseñanza-aprendizaje, garantizan la

calidad, disminuyen la distancia que existe entre el saber científico y el alumnado, es un medio de comunicación y difusión de la información.

### **3.1 Material didáctico**

Producto: Base de datos

Nombre del producto: Colección de rocas ígneas de México

Se ha elaborado una base de datos que integra la información de una colección de rocas ígneas de México que forma parte del acervo del Laboratorio de Petrología Ígnea de la Facultad de Ingeniería. Esta base de datos permite a estudiantes, académicos y otros interesados consultar información sobre la ubicación geográfica de las muestras, afloramientos, petrografía, geoquímica, y artículos científicos de la región. La base de datos se ha publicado a través de un portal virtual como medio de difusión al que se tiene acceso mediante el siguiente enlace: <http://rocasigneas.fi-a.unam.mx/>

### **3.2 Metodología y desarrollo de la base de datos**

Durante el proceso de diseño de la base de datos para la colección de rocas ígneas, se realizaron entrevistas con los responsables del proyecto que permitieron reconocer los siguientes requerimientos: resguardar información relativa al contexto geológico o afloramiento en el cual se colectó la muestra de roca, información sobre la descripción macroscópica de la muestra, descripciones petrográficas de los estudios en la sección delgada y la información sobre la geoquímica de la roca. Así también se indicó que la captura de información la realizará un usuario administrador de la plataforma (Figura 20).

A partir de dichos requerimientos, se crearon cuatro tipos de almacenes (base de datos) denominados de la misma manera. Sobre estos almacenes se realizan operaciones para guardar, eliminar, buscar, ordenar y modificar información geológica. El considerar el crecimiento gradual de la colección, propició la necesidad del desarrollo de una base de datos escalable; es decir, que en un futuro próximo se pueda agregar nuevas funciones y contenido con base a comentarios y sugerencias de estudiantes y profesores.

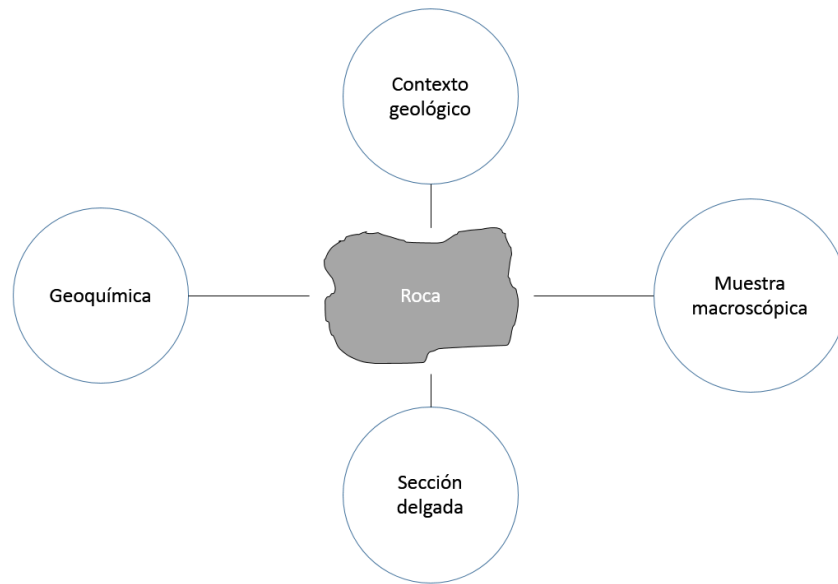


Figura 20. Requerimientos del proyecto. Resguardar información relativa al contexto geológico, información macroscópica de la muestra, descripciones petrográficas e información geoquímica.

La forma en que opera, la base de datos permite realizar una analogía a las funciones de un laboratorista: En una sesión ordinaria en la clase de laboratorio de petrología ígnea, regularmente el estudiante solicita alguna muestra de roca al laboratorista encargado; éste último la busca y la entrega al estudiante. La base de datos desarrollada en el presente trabajo, además de localizar la muestra y entregarla, hace el papel de “especialista” en información geológica; ya que además de las actividades descritas, tiene “conocimiento” geológico sobre la clasificación química, la ubicación geográfica precisa, descripciones macroscópicas y petrográficas e información geoquímica de cada roca que almacena, por ende sabe cómo buscar, modificar y entrega información geológica (Figura 21).

Cuando un usuario consulta información en la base de datos se realizan los siguientes pasos:

1) Solicitar información. El usuario solicita información de alguna roca proporcionando una clave o frase. Similar a cuando un estudiante pide alguna roca al laboratorista.



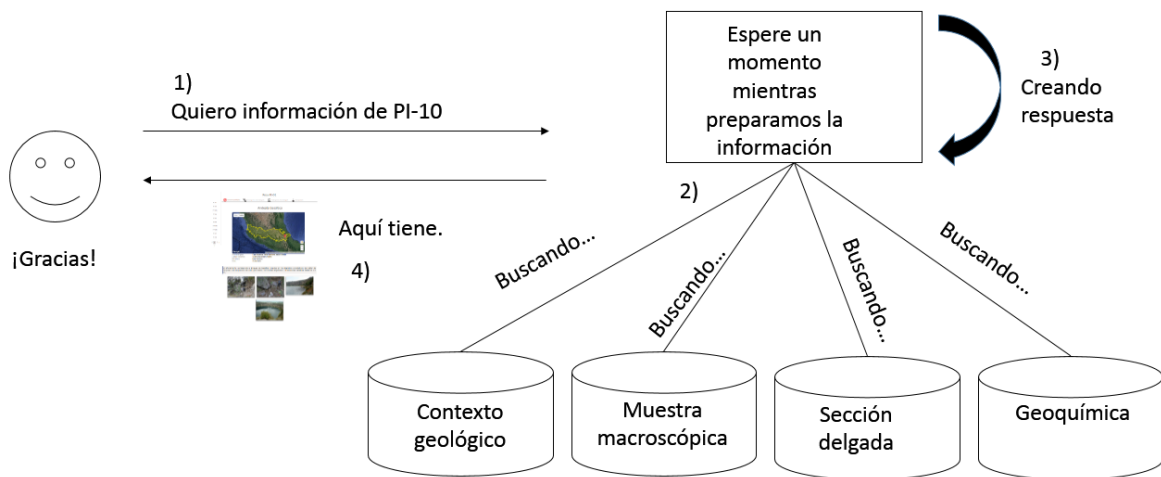


Figura 21. Solicitud de información a la base de datos. 1) Inicia cuando el interesado solicita información, 2) la base de datos empieza a buscar toda información referente a la petición, 3) la base de datos crea la respuesta y 4) la envía al interesado.

2) Buscar información. La base de datos busca información en el almacén apropiado (contexto geológico, muestra macroscópica, sección delgada, geoquímica), localiza la roca y recupera la información. El laboratorista se dirige al almacén para buscar la roca y la obtiene para el estudiante.

3) Crear respuesta. La base de datos; con la información obtenida, elabora un reporte de la roca para ser entregado. El laboratorista verifica que toda la información obtenida corresponde a la roca solicitada.

4) Entrega de información. La base de datos envía la información al estudiante en un formato legible, rápida, ordenada y consistente; además de estar siempre disponible para el estudiante. El laboratorista entrega la roca al estudiante.

### Representación y composición de una roca

Crear la respuesta para el estudiante consiste en integrar la información sobre la roca. La representación de una roca se realiza mediante la recuperación de todos los datos pertenecientes a una roca: coordenadas, clasificación de la roca, edad, fotografías, etc. Es decir, se crea un objeto virtual que representa a la roca que existe en el mundo real. Se toma una parte y se une con otra para crear algo más complejo que a su vez se une a otra parte y

así sucesivamente hasta crear la representación de la roca. Por ejemplo, tomemos el número 11.00; la base de datos asocia este valor con el elemento Rb. Ahora este par de datos se interpretan como el valor en partes por millón del elemento Rb. Este nuevo dato se integra con otros elementos traza y sus valores, como resultado se obtiene un análisis químico. Este análisis geoquímico la asocia con una roca en específico (por ejemplo, PI-01). Nuevamente, la roca debe estar en algún punto de la Tierra, por ello asocia las coordenadas geográficas correspondientes y determina un nuevo contexto geológico y así sucesivamente hasta crear la respuesta para el solicitante (Figura 22).

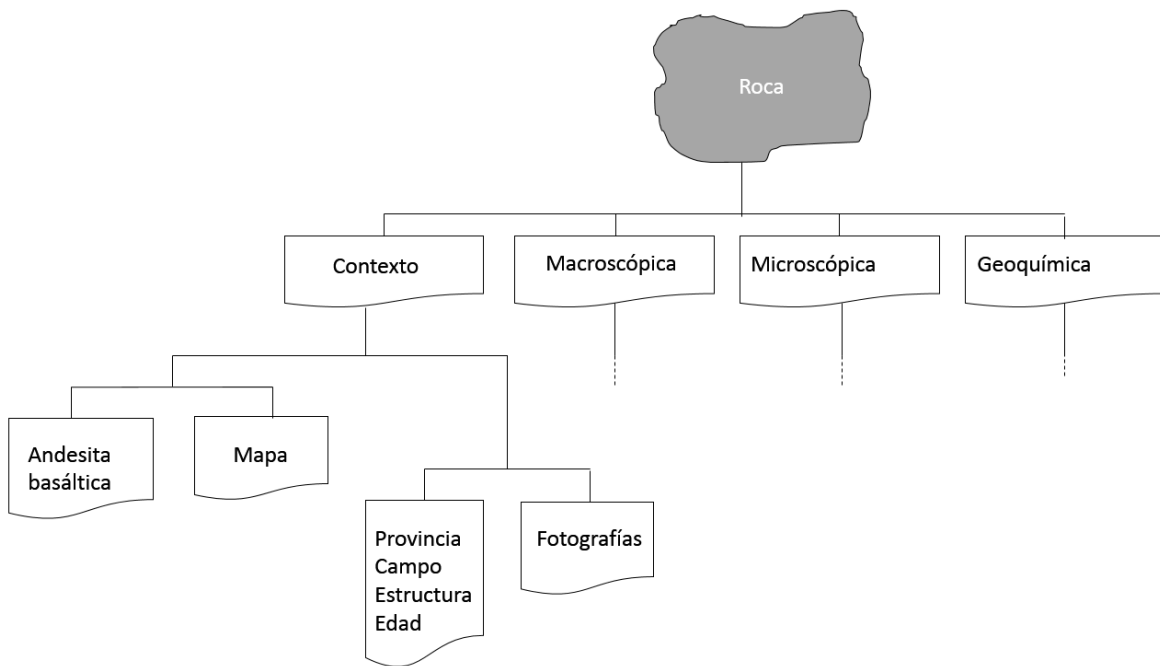


Figura 22. Representación y composición de una roca.

Para cada roca del mundo real, “existe” su correspondiente roca virtual. En la base de datos pueden existir dos rocas con la misma clasificación química, pero estas difieren por sus características. Suponer que en el mundo real se tienen dos andesitas; A y B. La andesita A tiene una serie de características: textura, color, minerales, tamaño de grano, etc. Esas características son diferentes de la andesita B. Sin embargo, tanto A como B son andesitas. En un sistema de clasificación se dice que A y B son ejemplares de una andesita, la clase

andesita. Una clase es como una especie de molde o fábrica para crear ejemplares; en este caso rocas.

En la base de datos de la colección de rocas ígneas de la Faja Volcánica Transmexicana existe una diversidad de rocas con diferente clasificación, y aunque existan rocas con la misma clasificación, pueden tener características particulares, las cuales están definidas por las siguientes características: contexto geológico, sus características macroscópicas, y microscópicas y su composición química. Cada roca virtual en la base de datos es única y diferente de las otras.

### Mapa Google Maps

Google Maps es un servidor de mapas privado y para su utilización se requiere de una licencia. Para el proyecto citado, se tiene una licencia para hacer uso de las herramientas de Google Maps. Se ha optado por Google Maps por ser el Sistema de Información Geográfico que recibe actualización de forma periódica; existen otras alternativas como OpenStreetMaps o Leaflet que posiblemente en un futuro pueda integrarse al presente proyecto.

Google Maps utiliza el sistema de coordenadas Sistema geodésico mundial de 1984, o estándar WGS84. Para la conversión de una ubicación del planeta en una ubicación en un mapa (la pantalla), primero debe convertirse valores de latitud y longitud en una coordenada del mapa. La conversión tiene lugar a través de una proyección de mapa. Google Maps usa la proyección de Mercator para este propósito. Las coordenadas del mapa de Google Maps se miden a partir de 180° de longitud; con incrementos en el sentido de la x, y aproximadamente 85° de latitud; incrementos en el sentido de la y, hacia el sur (abajo) que abarca casi la totalidad del planeta Tierra (Figura 23).



Figura 23. Coordenadas de mapa de Google Maps. Las coordenadas se miden desde el origen de la proyección de Mercator (Imagen tomada del sitio oficial de Google Maps Developers).

Google Maps utiliza la técnica llamada “Pirámides” para visualizar información en una Proyección de Mercator. Para ofrecer una imagen de toda la superficie de la Tierra, se necesitaría un mapa enorme, o bien, un mapa pequeño con baja resolución. Las pirámides son una versión del mismo mapa, pero con un submuestreo de datos. Es decir, las imágenes del mapa se descomponen en mosaicos y niveles *zoom* para crear varias escalas del mismo mapa. Cada mosaico es una fotografía de la superficie de la Tierra. A menor escala, se necesitan más fotografías para cubrir la misma área, pero es mejor el nivel de detalle del mapa. Observar que cada nivel de aumento de *zoom* tiene una resolución cuatro veces superior en comparación con el nivel anterior (Figura 24).

Google Maps muestra el contenido en capas. Una capa puede ser un conjunto de puntos, líneas y/o polígonos. Cada capa tiene un conjunto de atributos dependiendo del tipo de capa: color, forma, tamaño, coordenadas, entre otros. Para trabajar sobre las capas se utiliza la licencia de Google Maps.

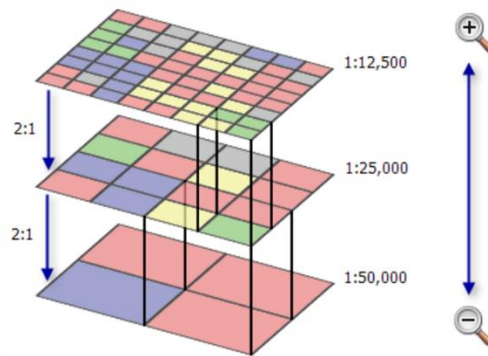


Figura 24. Pirámides en Google Maps (imagen tomada del sitio oficial de ArcGis). Observe que la relación de un elemento de la pirámide a otro es de 2:1.

Se han desarrollado seis capas en la elaboración de los mapas del proyecto de la colección de rocas ígneas de la Faja Volcánica Transmexicana; estas seis capas se sobreponen sobre un mapa base recuperado desde el servidor Google Maps:

- 1) Capa de coordenadas: Las coordenadas de cada una de las muestras de rocas se recuperan de la base de datos elaborada en este trabajo, en grados decimales y se crea una capa de puntos.
- 2) Capa geológica: Con ayuda de QGIS y a través de archivos formato *shape* se obtiene un archivo GeoJSON para crear una capa polígono que representa la Faja Volcánica Transmexicana. El polígono está georeferenciado en cada vértice.
- 3) Capa Satélite: Consiste de una capa que realza el relieve de la superficie terrestre.
- 4) Capa Etiquetas: Capa que muestra nombres de localidades.
- 5) Capa Mapa: Mapa base de Google Maps.
- 6) Capa relieve: Capa para resaltar la topografía con curvas de nivel de la superficie terrestre.

La Figura 25 muestra cómo se crea los mapas del portal virtual. Primero se recupera el mapa base del servidor de Google Maps, enseguida se modifica el mapa base y se elaboran las capas satélite, etiquetas y relieve. A continuación se crea la capa de coordenadas y se añade al mapa base. Finalmente se crear la capa geológica y se añade al mapa base. La

creación de mapas requiere el formato denominado GeoJSON. El formato GeoJSON puede representar datos geológicos con variedad de información. Este formato es utilizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

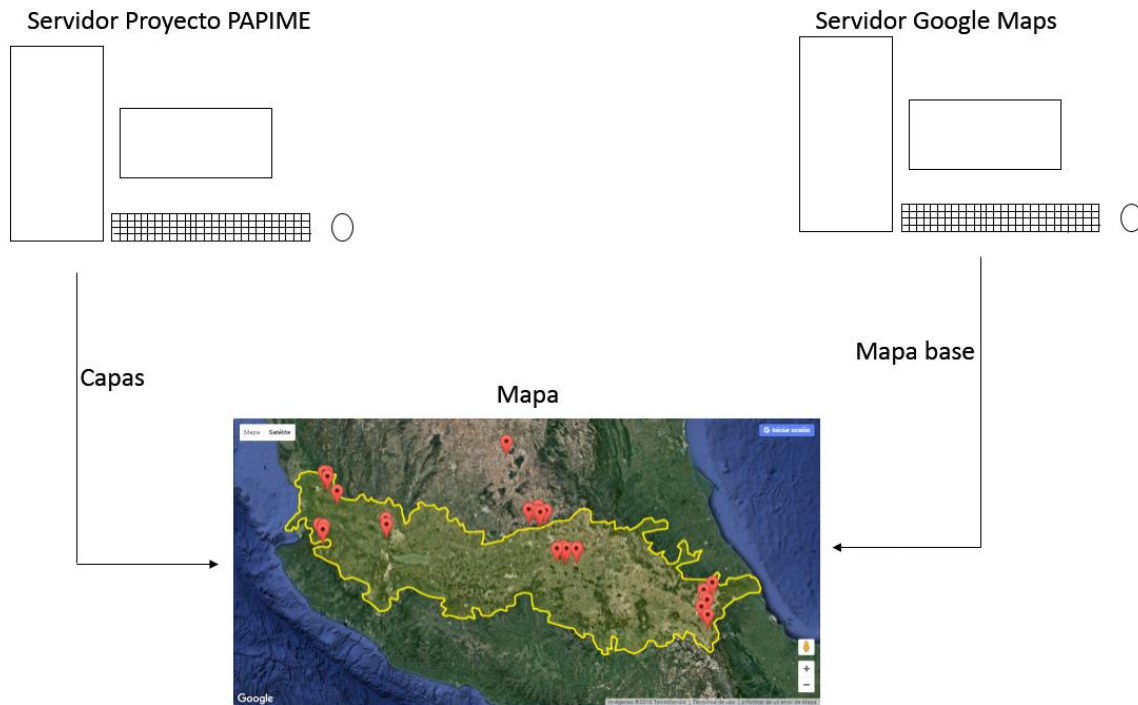


Figura 25. Elaboración de un mapa. Para elaborar un mapa se utiliza un mapa base y un conjunto de capas.

### 3.3 Manual del usuario

#### Base de datos

La base de datos está alojada en un servidor localizada dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería. Para poder tener acceso a ella utilice un navegador y diríjase a la dirección <http://rocasigneas.fi-a.unam.mx/>. Aparecerá la ventana de bienvenida (Figura 26).

## Elaboración de una base de datos para integrar una colección de rocas ígneas de México



Figura 26. Página principal de la base de datos Colección de rocas ígneas.

### Colección de rocas

Para explorar cada muestra de roca presione la opción 'Rocas' del menú principal. Aparecerá una página con un submenú como el que se ilustra en la (Figura 27).



Figura 27. Opción 'Rocas' del menú principal. En la parte inferior se muestra una serie de opciones para visualizar la información correspondiente.

Contexto geológico: Encontrará información sobre clasificación química, ubicación en un mapa de Google Maps, provincia ígnea, campo volcánico, estructura, edad, descripción del afloramiento, y fotografías acompañadas de su pie de fotografía (Figura 28).

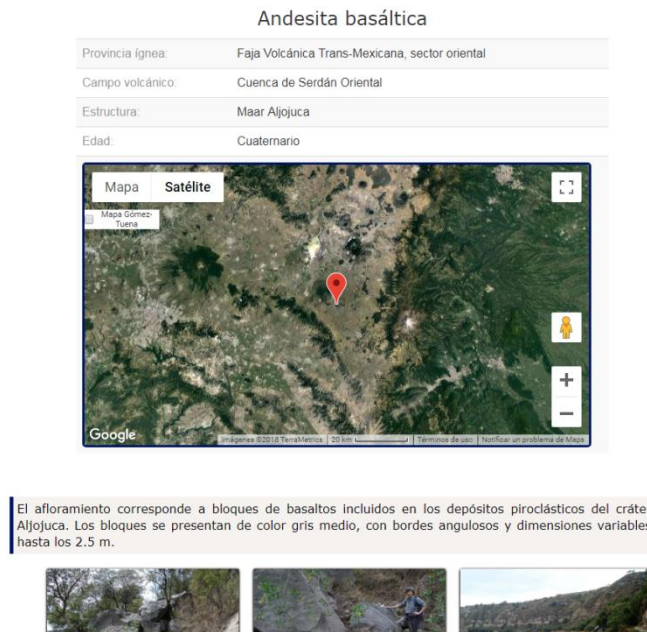


Figura 28. Contexto geológico. Se ilustran información sobre clasificación química, ubicación en un mapa de Google Maps, provincia ígnea, campo volcánico, estructura, edad, descripción y una serie de fotografías.

Descripción macroscópica: Se muestra una descripción de la muestra de mano y una serie de fotografías (Figura 329).



Figura 29. Descripción macroscópica. Se ilustra fotografía y descripción.

Descripción microscópica: Descripción petrográfica de fotografías bajo el microscopio. Las fotografías vienen en pares y a cada par corresponde una descripción (pie de fotografía). También se cuenta con una descripción general (Figura 30).



### Andesita basáltica

Roca con textura porfídica seriada con fenocristales de olivino y augita embebidos en una matriz vesicular, hipocristalina, compuesta por microcristales de plagioclasa, olivino, augita, vidrio y óxidos. [Plg>Ol>Aug>Mag] Los fenocristales de olivino presentan tamaño de fino a mediano, formas euedrales y subedrales con alto relieve, de birrefringencia alta, con fracturas típicas perpendiculares al alargamiento máximo de los cristales y golfos de corrosión. Los cristales de clinopiroxeno exhiben formas euedrales- subedrales, con extinción oblicua en secciones basales y colores de birrefringencia de segundo orden, se encuentran principalmente como parte de la matriz y glomerocristales. Con presencia de glomerocristales de olivino, así como de olivino con clinopiroxenos. Los cristales de plagioclasa son incoloros, con formas euedrales de tamaño mediano, birrefringencia baja (de primer orden), crucero en una dirección en ciertos cortes cristalográficos, relieve moderado y con maclas tipo albíta. También se observan ciertos dominios con textura de flujo, principalmente definidos por microcristales de plagioclasa. Los óxidos tienen formas cúbicas, por lo que posiblemente se trate de magnetita.

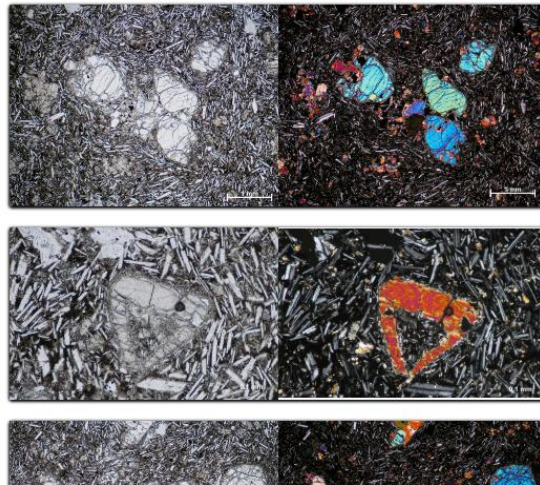


Figura 30. Descripción microscópica de la muestra. Imagen izquierda, nícoles paralelo e imagen derecha, nícoles cruzados.

Geoquímica: Se presenta un acceso a un archivo Excel descargable que contiene datos geoquímicos: elementos mayores y traza, gráfica TAS y  $K_2O$  vs  $S_2O$  (Figura 31).

### Andesita basáltica



Figura 31. Archivo formato Excel que contiene los datos geoquímicos de la muestra.

## Artículos

En el menú principal, seleccione la opción ‘Artículos’. Se mostrarán una serie de artículos de investigación relacionados con el magmatismo de la República Mexicana (Figura 32).



The image shows a website navigation bar with a logo on the left and a search box on the right. The menu items are: Inicio, Rocas, Variabilidad de la FVTM, Artículos, Conócenos, and Aplicar. Below the menu, there is a list of articles, each with a document icon and a title link.

- [Volcán Sangangüey](#)  
Beatriz A. Díaz-Bravo, Arturo Gómez-Tuena, Carlos Ortega-Obregón, Ofelia Pérez-Arvizu; The origin of intraplate magmatism in the western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geosphere* ; 10 (2): 340-373.  
[Caldera La Primavera](#)
- [Volcán Mascota](#)  
Mahood, G.A. Chemical evolution of a pleistocene rhyolitic center: Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Contr. Mineral. and Petrol.* (1981) 77: 129.  
[Caldera de Amealco](#)
- [Caldera de Amealco](#)  
Gómez-Tuena, A., Mori, L., Goldstein, S.L., Pérez-Arvizu, O., 2011. Magmatic diversity of western Mexico as a function of metamorphic transformations in the subducted oceanic plate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 213-241.  
[Caldera de Amealco](#)
- [Caldera de Amealco](#)  
Aguirre-Díaz, Gerardo. (1996). Volcanic stratigraphy of the Amealco caldera and vicinity, Central Mexican Volcanic Belt. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, ISSN 1026-8774, Vol. 13, Nº. 1, 1996. 13.
- [Caldera de Amealco](#)  
Gerardo J. Aguirre-Díaz, Fred W. McDowell, 2000. "Volcanic evolution of the Amealco caldera, central Mexico", *Genesis tectonics and volcanism of Mexico*. Hugo Delgado-González, Gerardo J. Aguirre-Díaz, Jean M. Stock

Figura 32. Sección de artículos de la base de datos.

## Iniciar sesión

Para iniciar sesión diríjase al menú principal y seleccione ‘Aplicar’. Posteriormente, proporcione los datos de su cuenta y a continuación presione ‘Validar’ (Figura 33).

## Elaboración de una base de datos para integrar una colección de rocas ígneas de México

Usuario

Contraseña

Validar

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Figura 33. Iniciar sesión. Llene los campos con los datos de la cuenta.

Esta sección es únicamente para el personal encargado de crear, actualizar y eliminar información dentro de la base de datos. Dentro de esta se realiza la captura de toda la información: contexto geológico, descripción, fotografías, coordenadas, etc. Por seguridad, en el presente documento no se describe.

### Variabilidad de la FVTM

Todas las muestras de rocas se muestran georeferenciadas en el mapa de Google Maps. Ver Figura 34.

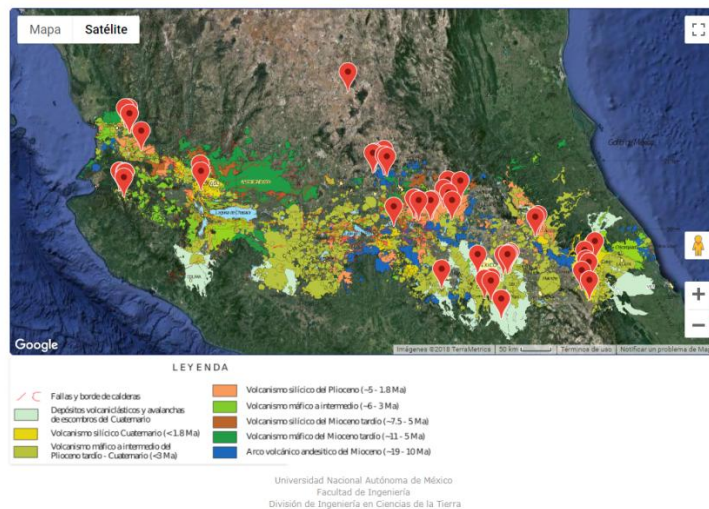


Figura 34. Colección rocas en la base de datos y su distribución a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana.

### **3.4 Herramientas utilizadas durante la elaboración del proyecto**

A continuación se mencionan las distintas herramientas utilizadas durante el desarrollo de la base de datos “Colección de rocas ígneas de México”; todas estas herramientas son gratuitas:

- 1) Servidor con procesador multinúcleos, tarjeta gráfica incrustada dentro de la placa base, lector de CD/DVD y disco duro SATA. Se ubica dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- 1) Inkscape. Software libre para editar elementos gráficos. Con ella se elaboraron íconos y definieron colores.
- 2) QGIS. Sistema de información Geográfica libre. Con este software se creó la capa geológica incrustada en Google Maps.
- 3) Google Maps. Mapa dinámico específico para *Apps*. En ella se muestra toda la información relativa al contexto geológico.
- 4) Netbeans. Es un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE por sus siglas en inglés). Aquí se escribió el código fuente de la aplicación.
- 5) Struts. Es un marco de desarrollo de software que utiliza el modelo de desarrollo Modelo-Vista-Controlador. Es software libre.
- 6) Hibernate. Es un marco de desarrollo que ayuda en el desarrollo de la base de datos.
- 7) Lenguaje de programación Java. Lenguaje utiliza para la codificación de la aplicación.
- 8) Windows server 2012. Sistema Operativo del servidor de la aplicación.
- 9) Servidor de aplicaciones Tomcat. Servidor de aplicación para atender las peticiones web.
- 10) MySQL Server. Servidor de la base de datos Entidad-Relación.
- 11) Google Chrome (Pruebas). Depuración y pruebas de la aplicación.

- 12) CSS. Lenguaje para la creación de estilos para la aplicación.
- 13) Javascript. Lenguaje para la creación de estilos dinámicos de la aplicación.
- 14) Java Server Page. Lenguaje de programación de sitios web dinámicos.
- 15) Debian (entorno de desarrollo). Sistema operación para el desarrollo de la aplicación.
- 16) Git (versionador de software). Herramienta para la administración del código fuente de la aplicación.

### **3.5 Representación de base de datos**

La Figura 35 representa el esquema de la base de datos para el presente proyecto. La base de datos está diseñada mediante el lenguaje de álgebra y cálculo relacional. Los cuadros representan un conjunto de objetos del mundo real (artículo, usuario, roca, etc.), los cuales se desean almacenar en un almacén de datos (base de datos); en total hay once conjuntos. Cada objeto de cada conjunto tiene características que deseamos guardar en nuestra base de datos.

Los conjuntos *artículo* y *usuario* que son conjuntos de artículos y de usuarios de nuestra base de datos, no tienen relación con algún otro conjunto, son simplemente conjunto de datos aislados independiente. El conjunto *roca* está asociado con el conjunto *dirección* por medio de la función  $f1$ . Para cada *roca* existe una coordenada única (latitud, longitud). El objeto *roca* puede existir sin tener asignada alguna coordenada, pero no puede existir una coordenada sin estar asociada a alguna roca. Se aplica el mismo razonamiento para las funciones  $f5$ ,  $f6$ ,  $f7$ .

Las funciones  $f2$ ,  $f3$ ,  $f4$  indican que una *roca* puede tener cero o más *fotografías* y cada fotografía corresponde únicamente a una roca. No puede ocurrir que existe alguna fotografía que no esté asociada a alguna roca. La asociación  $f8$  es particular porque las *fotografías* de lámina delgada se registran en pares. Para cada par de fotografías existe una descripción asociada.

Las funciones aquí descritas son la base para el desarrollo de las funciones encargadas de la manipulación de estos conjuntos (base de datos) mediante el lenguaje de programación Java. Esta base de datos es de tipo relacional (álgebra y cálculo relacional); tal como lo son las geodatabases de QGIS/ArcGIS.

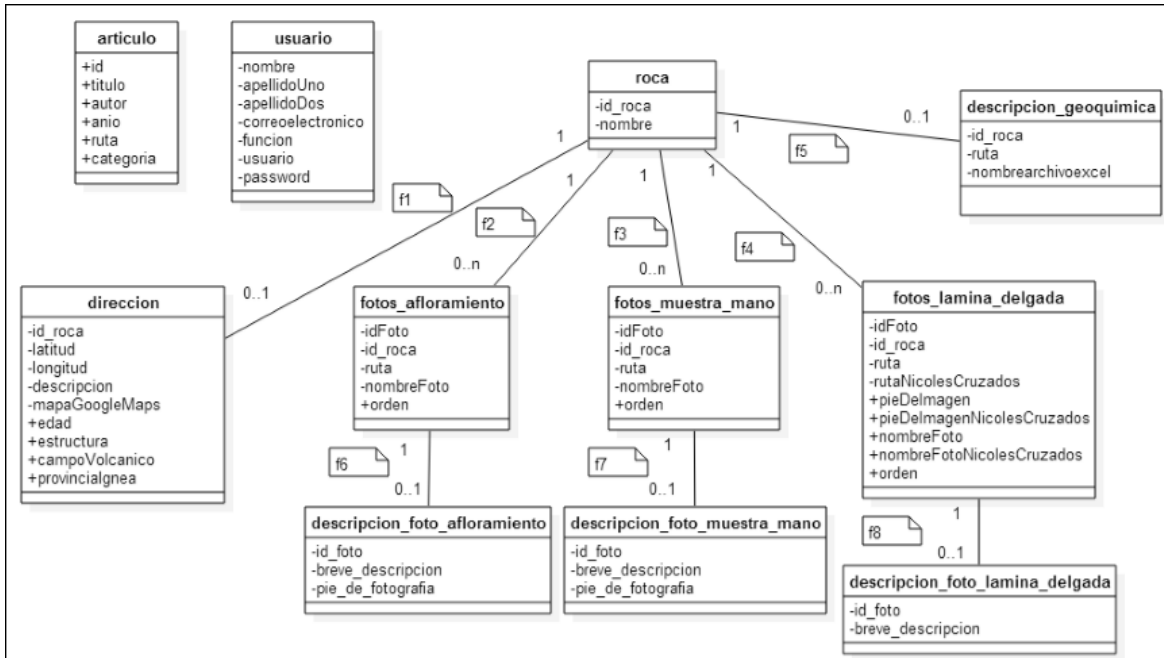


Figura 35. Esquema de la base de datos Colección de rocas ígneas de México. Dentro de las etiquetas se muestra el nombre de la función.

#### 4. CONCLUSIONES

El registro geológico de rocas ígneas en México es diverso en el tipo de litologías y características geoquímicas. Para contribuir a la enseñanza de la petrología ígnea a fin de que los alumnos puedan comprender los diferentes procesos que dan origen a dichas rocas, se ha elaborado esta base de datos, que permite disponer de información sobre su distribución espacial, de las descripciones de los afloramientos y de muestras de mano, así como de sus constituyentes mineralógicos, texturas y composición química.

La base de datos “Colección de rocas ígneas de México” es un material didáctico que proporciona a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, un medio más para difundir el conocimiento científico de nuestro país. Es un material cuya disposición no es solo para los

alumnos de la carrera Ingeniería Geológica; sino también para cualquier persona interesada en el tema, un medio de aprendizaje y consulta de información.

La información de esta base de datos, permitirá tener un mejor control de las colecciones de rocas y láminas delgadas, contar con grandes volúmenes de información ordenados y sistematizados, proporcionar a los alumnos un mayor número de elementos objetivos para el análisis de la información, así como la oportunidad de poder aprender la petrología ígnea de manera más integral, así como proporcionarles un acercamiento al conocimiento de la geología de México.

Esta base de datos es una primera etapa para construir gradualmente una colección de mayor escala, que incluya posteriormente otras provincias ígneas y seguramente en un futuro tendrá mayor información que favorecerá significativamente el proceso de enseñanza y el aprendizaje.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

- ArcGis, disponible en <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/raster-pyramids.htm>, consulta: 09-agosto-2018.
- Aguilera, G. J., 1896: Bosquejo Geológico de México, Boletín del Instituto Geológico de México (Original no consultado, citado en Ferrari, L.; Morán, D.; González, E., 2007).
- Bryan, S. E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L. & López-Martínez, M., 2013, Pulling apart the Mid to Late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: is there a Comondú Arc?: Geological Society, doi 10.1144/SP385.8
- Castro-Govea, R., Siebe, C., 2010, 2010, La historia eruptiva del volcan La Malinche, en Castro-Perez F, Tucker T.M. (eds.), Matlacueytl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo, Tomo I: El Colegio de Tlaxcala, Mesoamerican Research Foundation-CONACYT, pp.75-108.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S., López-Martínez, M., Silva-Fragoso, A., 2018, Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift, *Earth-Science Reviews* 183 (2018) 115–152, doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Navarro, M., López-Quiroz, P., Luna, L., 2017, Cartografía Geológica Digital y Base de Datos Geocronológica del Cinturón Volcánico Transmexicano y Áreas Contiguas, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México, Vol. 2 (1), 1-8, DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.34.95, publicado por Terra Digitalis.
- Ferrari, L., Bergomi, M., Martini, M., Tunesi, A., Orozco-Esquivel, T., y López-Martínez, M., 2014, Late Cretaceous-Oligocene magmatic record in southern Mexico: The case for a temporal slab window along the evolving Caribbean-North America-Farallon triple boundary, *Tectonics*, 33, 1738–1765, doi:10.1002/2014TC003525.



- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M. 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522-523,122-149. doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Ferrari, L., Morán, D., González, E., 2007, Actualización de la Carta Geológica de México, escala 1:4 000 000: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Centro de Geociencias, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo Del Centenario, 57 (3), 343-378.
- Ferrari, L., Lopez-Martinez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999, Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican volcanic belt: *Geology*, 27, 303-306.
- Gill, R., 2010, *Igneous rocks and processes: a practical guide*, 1st edition, Department of Earth Sciences Royal Holloway, University of London, Wiley-Blackwell editorial, pp. 1-18.
- Gómez-Tuena, A., Mori, L., Straub, S., 2018, Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt, *Earth-Science Reviews* 183 (2018) 153–181. doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.006
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo Del Centenario, 57 (3), 227-283.
- González-Torres, E., 2004, Bosquejo sobre la evolución de la Geología en México (1904-2004), Universidad Nacional Autónoma de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo Del Centenario, 57 (3), 123-136.

- Google Maps Developers, disponible en <https://cloud.google.com/maps-platform/?hl=es>, consulta: 09-agosto-2018.
- Macías, J. L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grande volcanes activos de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Departamento de Vulcanología, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo Del Centenario, 57 (3), 379-724.
- Martín-Barajas, A., 2000, Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V. 53, n. 1, (2000) 72-83.
- Moddle, disponible en <https://moodle.net/stats/?lang=es>, consulta: 10 marzo 2019.
- Morán-Zenteno, D.J., Martiny, B., Solari, L., Mori, L., Luna González, L., González-Torres, E.A., 2018, Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico, *Earth-Science Reviews*, 183, 85-114, [doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.010](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.010)
- Morán-Zenteno, D.J., Cerca, M., and Keppie, J.D., 2007, The Cenozoic tectonic and magmatic evolution of southwestern México: Advances and problems of interpretation, in Alaniz-Álvarez, S.A., and Nieto-Samaniego, Á.F., eds., *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422*, p. 71–91, doi: 10.1130/2007.2422(03).
- Morán-Zenteno, D.J., Cerca, M., Duncan, J., 2005, La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del centenario, Temas selectos de la Geología de Mexicana*, 53 (3), 319-341 p.
- Mori, L., Morán-Zenteno, D., Martiny, B., González-Torres, E., Chapela-Lara, M., Díaz-Bravo, B., Roberge, J., 2011, Thermomechanical maturation of the continental crust and its effects on the late Eocene–early Oligocene volcanic record of the Sierra Madre del Sur Province, southern Mexico, *International Geology Review*, 54:13, 1475-1496, doi:10.1080/00206814.2011.644745.

- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Morán-Zenteno, D., Solari, L.A., Luna-Gonzalez, L., Schaaf, P., 2014. A review of batholiths and other plutonic intrusions of Mexico. *Gondwana Research*, 26(3-4), doi: 26. 10.1016/j.gr.2014.05.002.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldan-Quintana, J., Aranda-Gómez, J., Morán-Zenteno, D., Alaníz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A., 1992, Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2 000 000: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- PAPIME, Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza: Dirección General de Asuntos del Personal Académico, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en <http://dgapa.unam.mx/html/papime/papime.html>, consultado 09 de agosto de 2018.
- Silva, G., Mendoza, C. C., Campos, E., Victoria, A., Cabrera, M. A., Cruz, J. C, Geocampo digital: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en <http://cartografia.fi-a.unam.mx/index.php>, consulta: 10 de febrero de 2018.
- Silva, G., Mendoza, C. C., 2011, Manual para el Trabajo Geológico de Campo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 149-156.
- Universidad Complutense de Madrid, Atlas de rocas ígneas: Departamento de Petrología y Geoquímica, disponible en <https://petroignea.wordpress.com/>, consulta: 09-agosto-2018.
- Universidad de Granada, Petrología ígnea: disponible en <http://www.ugr.es/~petquim/BasesDatosWeb.htm>, consulta: 11-agosto-2018.
- Valencia-Moreno, Martín, y Ortega-Rivera, Amabel, 2011, Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México—Evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide), in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 118, cap. 6, p. 201–226.

Victoria, A., Amparo, M., Rocas Metamórficas, disponible en <http://metamorficapapime.wix.com/rocasmetamorficas>, consulta: 18 de agosto de 2018.

White, M., 2015, Probing the Earth's deep interior through geochemistry, Volumen 4, Número 2, en Benning, G., Blichert-Toft, J., Elliot, T., Oelkers, E., Stipp, L.S. (eds.), *Geochemical Perspectives* , pp. 95-105.