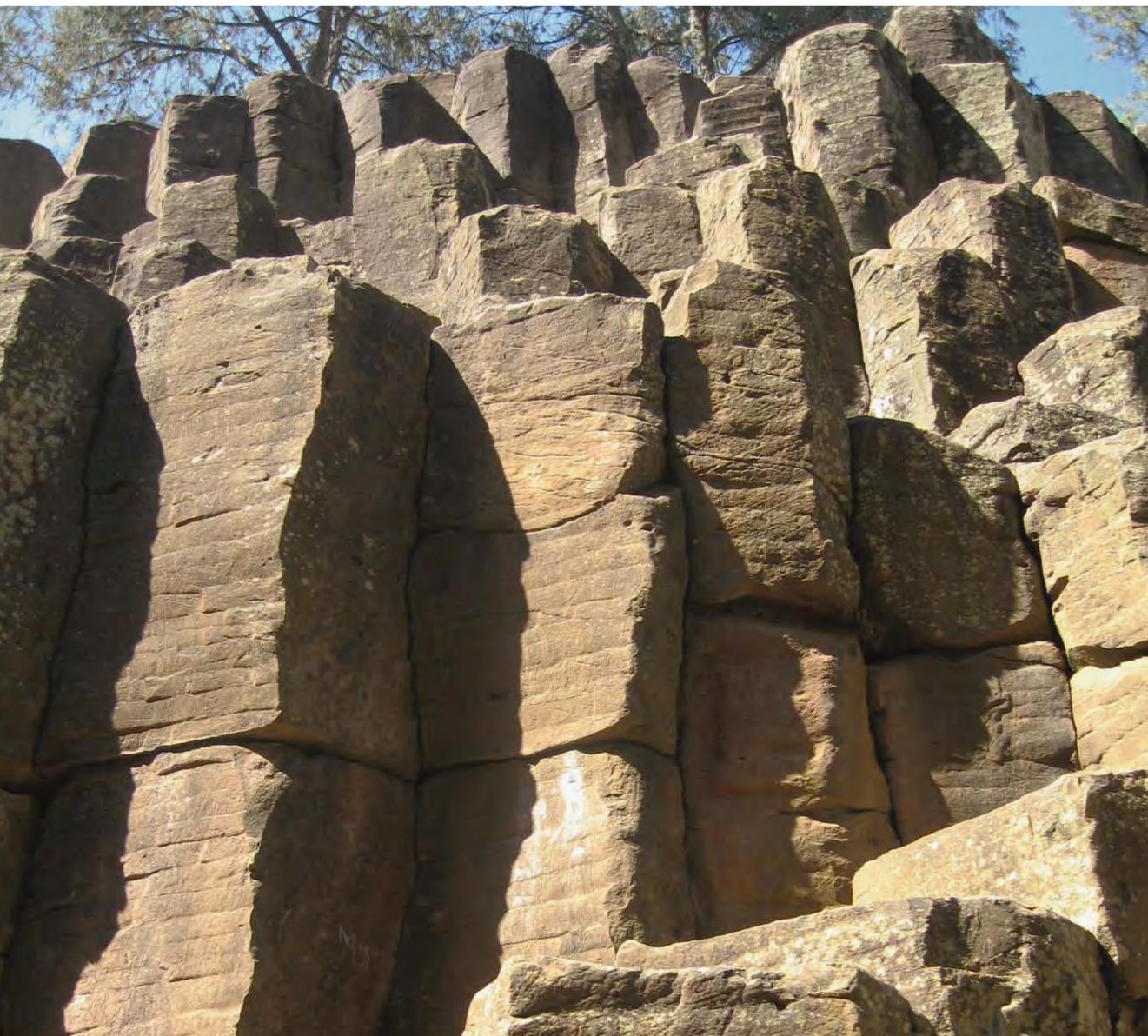




SE



GEOLÓGIA Y PETROGÉNESIS  
DE LOS PRISMAS BASÁLTICOS,  
SANTA MARÍA REGLA, HGO.

EDMUNDO SÁNCHEZ ROJAS,  
MYRIAM OSORIO PÉREZ



ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

GEOLÓGIA Y DISTRIBUCIÓN  
DE LA AMAZONITA  
EN LOS GRANITOIDES

MIKHAIL OSTROUMOV



ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

EL ARRECIFE DE CORAL

ROGER MAUVOIS



MÉXICO

ACTÚA

SECRETARÍA  
DE ECONOMÍA

## DIRECTORIO

Director General      Subdirector de Investigación  
**Rafael Alexandri Rionda**      **Juan Carlos Salinas Prieto**

Director Técnico      Corrección Técnica  
**Alfonso Martínez Vera**      **Jorge E. Bustamante García**

Director de Administración y Finanzas      Diseño, Formación y Edición  
**Cauhtémoc Rodríguez Espinosa**      **Angélica Montiel Beltrán**

El Servicio Geológico Mexicano extiende una cordial invitación a sus lectores para que hagan llegar a la redacción sus opiniones, comentarios o sugerencias sobre la publicación que ponemos en sus manos.

El Organismo ha desarrollado un esfuerzo especial para brindar a la comunidad de las Ciencias de la Tierra un producto de calidad y desea conocer la opinión de sus lectores sobre el contenido del mismo, así como recibir ideas para nuevos proyectos, todo ello orientado a proporcionar niveles de calidad siempre crecientes.

Número de reserva al Título en Derecho de Autor: 04-2007-010415235300-102

# Contenido

REVISTA DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO  
AÑO 2 / NO. 3 / ABRIL 2008

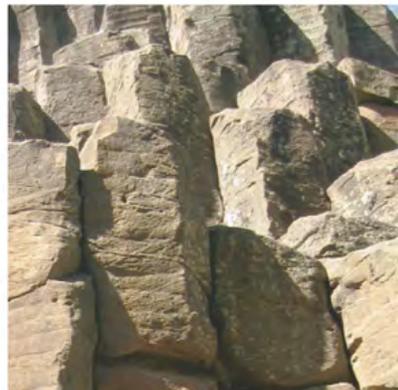
NORMAS  
EDITORIALES

2

GEOLOGÍA Y PETROGÉNESIS  
DE LOS PRISMAS BASÁLTICOS,  
SANTA MARÍA REGLA, HGO.

EDMUNDO SÁNCHEZ ROJAS,  
MYRIAM OSORIO PÉREZ

5



ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN  
GEOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN  
DE LA AMAZONITA  
EN LOS GRANITOIDES:  
ASPECTOS MINERALÓGICOS,  
CRISTALOQUÍMICOS Y TIPOMÓRFICOS

MIKHAIL OSTROUMOV

25

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN  
EL ARRECIFE DE CORAL  
UN ECOSISTEMA PLANETARIO  
COMO ALTERNATIVA AL  
CALENTAMIENTO GLOBAL

ROGER MAUVOIS

36

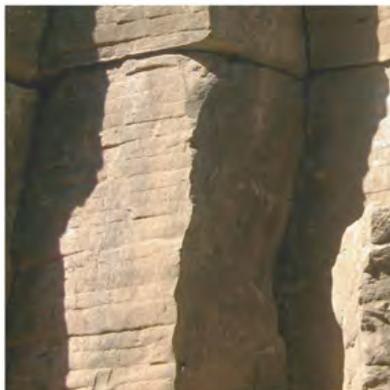


FOTO DE PORTADA:  
PRISMAS BASÁLTICOS,  
SANTA MARÍA REGLA,  
HGO., MÉXICO

AUTOR:  
EDMUNDO SÁNCHEZ

# Normas Editoriales

## para la recepción de trabajos

La Revista geoCiencia SGM es una publicación cuatrimestral del Servicio Geológico Mexicano, que tiene por objetivo difundir trabajos científicos y de aplicación originales afines a las Ciencias de la Tierra.

Estos trabajos serán revisados por tres árbitros de reconocido prestigio, especialistas en la materia.

La finalidad de la Revista geoCiencia SGM, es contribuir a la confrontación y difusión de conocimientos en las áreas que considera de su interés particular.

La Revista geoCiencia SGM, permite la reproducción parcial de los artículos siempre que se reconozca la fuente y los autores. El contenido de los artículos es de exclusiva responsabilidad de los autores.

La revista se regirá por las siguientes pautas generales:

- 1.- Considerará para su publicación trabajos científicos originales, avances de investigación geológica y ambiental, cuya finalidad sea contribuir al avance del conocimiento en el área de las Ciencias de la Tierra, y se reserva el derecho de hacer las modificaciones de forma que el Comité Editorial considere necesarias.
- 2.- Los autores deberán enviar el artículo acompañado de una copia impresa dirigida al Comité Editorial a través de **editorial@coremisgm.gob.mx** o a Boulevard Felipe Ángeles km 93.50-4 Col. Venta Prieta, Pachuca, Hgo. (Departamento Editorial de la Subdirección de Investigación).
- 3.- Se debe anexar una breve reseña curricular incluyendo nombres y apellidos, grados académicos, dirección institucional, apartado postal, correo electrónico, teléfono(s), cargo e institución donde trabaja.
- 4.- Los trabajos serán evaluados de acuerdo a los siguientes criterios: claridad y coherencia, adecuada organización interna, aportes al conocimiento del objeto, adecuada elaboración del resumen y pertinencia del título.
- 5.- ENTREGA DE TEXTOS E IMÁGENES  
La recepción de artículos es continua durante todo el año y no existen convocatorias ni fechas para artículos en general.
- 6.- El envío de la información deberá hacerse de la siguiente manera:

- Archivo electrónico del texto del artículo y resumen, en formato de texto o Microsoft Word, en disco compacto.
- Archivo electrónico de las ilustraciones en formato .tiff o .jpg, a una resolución no menor a 300 DPI's. (Los casos especiales, serán discutidos con el autor).
- Fotografías debidamente referenciadas y en formato .tiff o .jpg a una resolución no menor a 300 DPI's.

#### 7.- Normas editoriales:

- Presentación en documento de WORD
- Tamaño Carta
- 20 a 30 páginas incluyendo título, bibliografía y anexos
- Cuerpo de texto con tamaño de letra de 11 puntos (Arial)
- Títulos 14 puntos (Arial negrita)
- Subtítulos 12 puntos (Arial negrita)

Los dictámenes de la revisión serán enviados al autor responsable y, en caso de ser necesario, las observaciones para realizar las correcciones y/o adecuaciones pertinentes.

#### ESTRUCTURA BÁSICA

- Título: Debe ser sugerente y recoger la esencia del trabajo
- Autores: Indicar los nombres y apellidos completos sin colocar títulos profesionales.
- Direcciones de los autores: indicar dirección institucional y/o correo electrónico.
- Resumen en español y en inglés de entre 200 y 350 palabras.
- Notas al final del texto, ubicadas antes de la presentación de las referencias bibliográficas.

#### TIPOS DE ARTÍCULO

##### Artículos originales de investigación y desarrollo

Presentación de un conocimiento original o el desarrollo de un dispositivo innovador, enmarcado dentro de un análisis crítico de la bibliografía actual, las técnicas existentes y la problemática en particular. Esta presentación incluye los métodos experimentales o de evaluación y los resultados obtenidos.

##### Artículos de divulgación o información

Presentación de un tema bien delimitado y de interés general, con una exposición clara y bien ilustrada y una discusión de los problemas y perspectivas apoyados firmemente en la bibliografía existente.

#### TABLAS

Cada tabla debe incluir su referencia numerada en el orden de aparición en el texto y un título descriptivo.

Es importante formar la tabla con un tabulador de procesador de palabras o con una hoja de cálculo, y no sólo con espacios en el texto. Es recomendable no generar tablas con demasiados datos, que pueden ser confusas y difíciles de leer; en estos casos es preferible usar tablas múltiples. Las tablas pueden ser incluidas al final del archivo de texto generado por el procesador de palabras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Las referencias bibliográficas deben aparecer, en orden alfabético, en una sección independiente al final del artículo. Sólo se pueden incluir referencias bibliográficas citadas directamente en el texto.

## PAUTAS O ESPECIFICACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Los datos de la referencia se tomarán del documento fuente. Se extraerán principalmente de la portada y de otras partes de la obra, en caso necesario.

Apellido y nombres del autor (es), año de edición, título de la publicación, editorial, lugar de edición, número de la revista o boletín (si es el caso), número de páginas o entre qué páginas de la publicación se encuentra el trabajo citado. Ejemplos:

Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Camprubi-Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del centenario. Tomo LVII, Núm. 3, pp.285-318.

Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Pier, J. G., 1993, Geología de los volcanes cuaternarios portadores de xenolitos del manto y de la base de la corteza en el Estado de San Luis Potosí, México: Boletín del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 106, pt. 1, 1-22.

Díaz-Salgado, C., 2006, Interpretación de la edad del depósito de la Formación Nazas: Sociedad Geológica Mexicana, Memorias de la 5ª Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Puebla, Pue., p.6.

- Los nombres de los autores se abrevian a sus iniciales.
- Cuando existen varios autores se separarán por punto y coma y un espacio. Al citar dentro del texto un trabajo realizado por mas de dos autores, se hará constar el primero seguido de la abreviatura *et al.* y el año de publicación.
- En el caso de obras anónimas, el primer elemento de referencia será el título

Se pueden añadir elementos que no aparezcan en el documento fuente, con el fin de completar la información. Estos elementos deberán ir encerrados entre corchetes [ ] o entre paréntesis ( ), normalmente a continuación del elemento modificado.

# Geología y petrogénesis de los Prismas Basálticos

## Santa María Regla, Hgo.

Edmundo Sánchez Rojas<sup>1\*</sup>, Myriam Osorio Pérez<sup>1</sup>

Subdirección de Investigación<sup>1</sup>, Servicio Geológico Mexicano

\*lesanchez@coremisgm.gob.mx

### RESUMEN

Los prismas basálticos de Santa María Regla se localizan en el centro oriente del estado de Hidalgo, dentro del Municipio de Huasca de Ocampo en el extremo oriental de la Faja Volcánica Transmexicana.

Las rocas que predominan en la región son de composición variable desde andesita y riolita a basalto producto de actividad volcánica pliocénica, en forma de derrames, depósitos de flujo y escombros. Hacia el pliocuaternario se depositan rocas más básicas asociadas a conos de escoria y flujos en los que desarrollan las estructuras prismáticas.

Se colectaron dos muestras en diferentes niveles aflorantes en la margen austral del Río Tulancingo, para determinar su edad por el método K-Ar. De su análisis se desprende que la edad del derrame que generó la prismatización es de  $2.58 \pm 0.15$  Ma.

El origen y proceso de formación de los prismas basálticos en el caso particular de Santa María Regla, es inicialmente provocado por el desarrollo de una corriente fluvial que fue obstruida por el vulcanismo de la Sierra de Las Navajas, lo cual generó cuerpos de agua aislados. Posteriormente, se desarrolló una copiosa actividad volcánica basáltica en toda la región de Hidalgo y Veracruz hacia finales del Pleistoceno e inicio del Cuaternario. Cuando un potente derrame de lava basáltica se intersecta con un río o pequeño brazo lagunar, ocurre un rápido enfriamiento de las superficies superior e inferior del derrame aislando el cuerpo lávico en el centro de estas dos superficies solidificadas.

El arroyo al continuar su flujo sobre la superficie superior del derrame induce a un enfriamiento rápido, constante y homogéneo del cuerpo lávico aislado, lo cual desarrolla el proceso de contracción volumétrica a partir de puntos de mayor temperatura que al progresar desarrollan fracturas de tensión entre dos de estos puntos, al irse uniendo todas las fracturas de tensión individuales, desarrollan la prismatización.

Por último el proceso fluvial de la barranca de Alcholoja sobre el derrame terminó por erosionarlo y seccionarlo casi hasta su base como actualmente se aprecia, mostrando los prismas como la maravilla natural que actualmente apreciamos.

**Palabras clave:** Prismas basálticos, enfriamiento homogéneo, contracción volumétrica, Hidalgo México.

## ABSTRACT

*The Basaltic prisms in Santa María Regla are located in the center east of the Hidalgo State inside the Huasca de Ocampo Municipality. It is located in the oriental end of the Transmexican Volcanic belt.*

*The rocks that prevail in the region varies in composition from andesitic, rhyolitic and basaltic derived of a great pliocenic volcanic activity, in form of lava flows, deposits flow and debris avalanch with laminar structures and free fall, in pliocuaternary the rocks are more basic associated to cinder cones and lava flows that develop the prismatic structures.*

*In order to know the basalt's age that originated these prisms, two samples were collected in diferent levels outcrop in the Tulancingo's river southern. The K-Ar method in the Instituto de Geología of the UNAM was choosed. This analysis shows that the age of the lava flow is  $2.58 \pm 0.15$  Ma.*

*The basaltic prisms, in the peculiar case of Santa María Regla, were caused by the development of a fluvial current obstructed by the volcanic flow of the Sierra de las Navajas which generated bodies of isolated water. When a potent lava flow (30 m of thickness) of very homogeneous basaltic lava intersect with a river or small lake, it quickly cooled at the superior and inferior surfaces of the discharge resulting in a isolation of the lavic body between these solidified surfaces.*

*The stream flow on the superior surface induces a quick, constant and homogeneous cooling of the isolated lavic body, generating a volumetric contraction process, starting between points of high temperature that develop tension fractures between two points. When progressing the contraction, links all the individual fractures of tension, develops the prismatization structure.*

*The fluvial process in Alcholoya canyon finished eroding the lava flow and cut it, showing the prisms like the natural marvel that at the moment we appreciate.*

**Key Words:** *basaltic prisms, homogeneous cooling, volumetric contraction, Hidalgo Mexico.*

# 1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se realizó en respuesta a la solicitud del Gobierno Municipal de Huasca de Ocampo Hgo., al Servicio Geológico Mexicano, para conocer el marco geológico e interpretación sobre los mecanismos que dieron origen a los Prismas Basálticos en Santa María Regla. Esto, en el contexto de la inscripción que se hizo recientemente de los Prismas Basálticos en el listado de las “13 Maravillas de México”, lo cual genera la inquietud de ofrecer información científica sobre esta maravilla natural al visitante.

A pesar de que esta localidad es ampliamente conocida desde el siglo XVIII, ya que en ella se localiza la hacienda de Santa María Regla en la cual se realizaba la metalurgia de los minerales explotados en los distritos mineros de Pachuca - Real del Monte, son pocos los estudios geológicos realizados en el área.

La primera referencia de estos prismas fue realizada por Alexander von Humboldt cuando visitó esta región en 1803 (Humboldt *et al.*, 1991), un poco después es la época en que sucede la modernización de las minas bajo la gerencia de empresas inglesas.

Geyne *et al.* (1963), realizan un estudio sobre las rocas del distrito Pachuca-Real del Monte e incluyen estas rocas dentro de la Formación San Cristobal.

En 1976, Robin propone las fases del vulcanismo en México y Edward John describe el ambiente geoquímico de las rocas volcánicas en los límites entre los estados de Hidalgo y Veracruz.

En 1983 el INEGI publica la primera edición de la carta geológica Pachuca en escala 1:250,000 con la primera cartografía geológica a esta escala y en 1994, Moore *et al.*, diserta sobre la complejidad del vulcanismo de esta región ya que ahí se presenta la intersección entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Provincia Alcalina Oriental.

López-Reyes *et al.* (1997), elaboran por parte del Consejo de Recursos Minerales la cartografía geológica-minera y geoquímica de la carta Pachuca F14-11 a escala 1:250,000 abarcando principalmente el estado de Hidalgo y parte de otros estados colindantes, aportando nueva información geológica, estratigráfica y minera colectada en campo. Ese mismo año, Stephen y Alyson (1997) publican dentro del marco de la II Convención sobre la evolución geológica de México y recursos asociados, un libro guía con la geología de la Sierra de Las Navajas mencionando datos sobre los prismas basálticos de Santa María Regla.

Ferrari (2000), sintetiza las principales contribuciones en el campo geológico, geoquímico y geofísico tendientes a comprender el origen y

evolución de la Faja Volcánica Transmexicana, aunque igualmente señala la constante controversia sobre esos puntos. En otro artículo, Ferrari (2004) propone un nuevo modelo con base en un traslape entre pulsos máficos y heterogeneidades mantélicas o rompimiento de un trozo de la placa subducida, para explicar el carácter alcalino de varias rocas de la Faja Volcánica Transmexicana como las que dieron origen a los prismas aquí estudiados.

Como puede desprenderse de esta síntesis, los pocos trabajos que abarcan la región, refieren de manera generalizada la evolución de los basaltos, pero no existe un estudio específico de ellos.

Con la finalidad de proponer el origen de estas estructuras geológicas se realizó un estudio de los basaltos columnares, el cual consistió en el análisis de información recopilada de la región y sobre la génesis de los prismas basálticos, interpretación de imágenes de satélite, cartografía geológica, muestreo y análisis petrográfico, isotópico y geoquímico.

## 2. LOCALIZACIÓN Y ACCESO AL ÁREA

El área en estudio se localiza en el centro oriente del estado de Hidalgo (Figura 1) y pertenece al Municipio de Huasca de Ocampo. Queda comprendido dentro de los límites geográficos de la carta Pachuca a escala 1:250,000 de acuerdo a la división utilizada por el INEGI.

El acceso al área, se efectúa partiendo de la ciudad de Pachuca por la carretera No. 105 hacia Huejutla de Crespo y después de pasar el poblado de Omitlán de Juárez, se toma una desviación hacia Huasca de Ocampo; de aquí, parten dos caminos hacia el Parque Natural de los Prismas Basálticos.

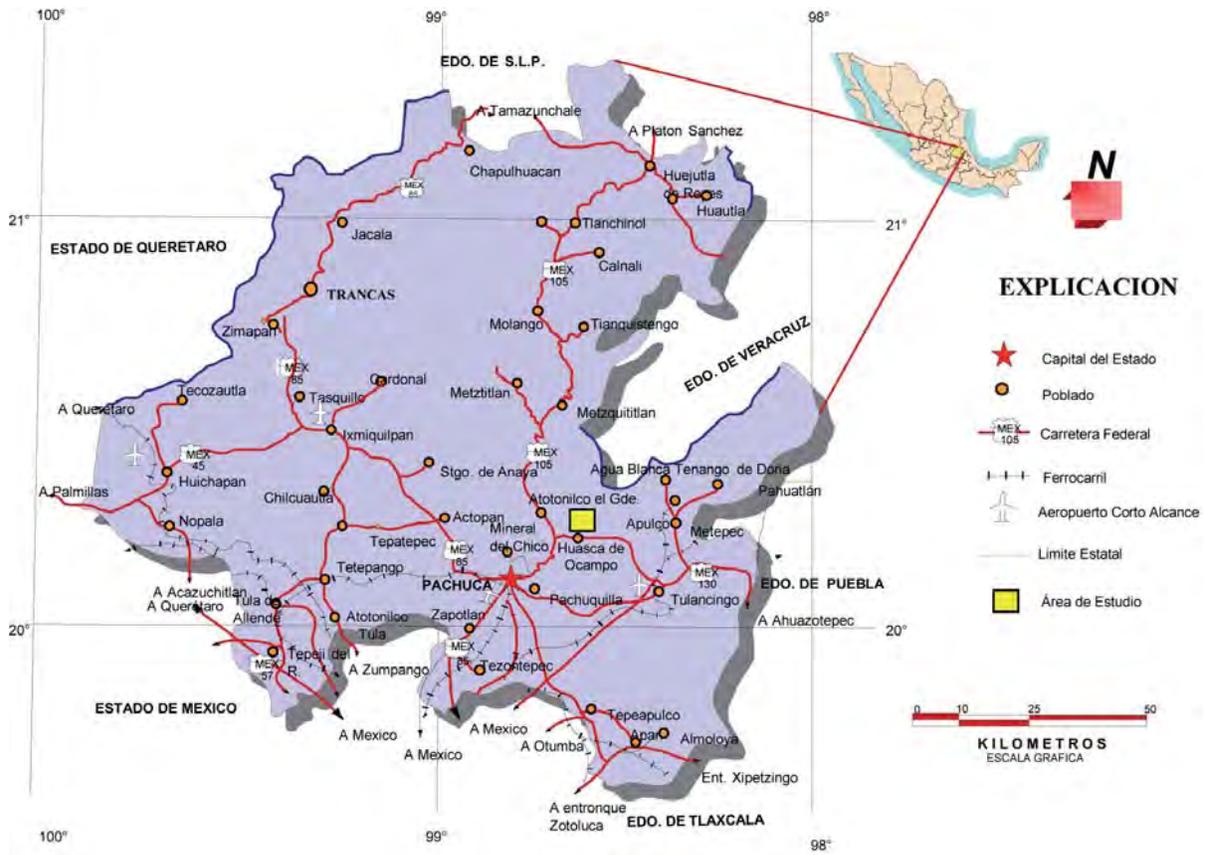


FIGURA 1. Plano de localización

### 3. FISIOGRAFÍA

Según la clasificación de Raisz (1964), el área en estudio queda en el extremo oriental de la Faja Volcánica Transmexicana. Sin embargo, en forma más local, el área se encuentra enmarcada por dos campos volcánicos sobrepuestos en un valle intermontano que desciende de La Sierra de Las Navajas por una planicie de origen volcánico hasta el valle del Río Tulancingo.

La elevación predominante del área, es el cerro Las Navajas (3180 m.s.n.m.), el cual es un remanente de un cráter de explosión colapsado hacia la porción norte desarrollando la planicie

que actualmente alberga los prismas basálticos. La porción más baja está localizada hacia el norte de los prismas y constituye el valle del Río Tulancingo, el cual se ubica por debajo de los 1500 m.s.n.m. (Figura 2).

### 4. MARCO GEOLÓGICO

La región donde se encuentran los prismas, presenta un marco geológico definido por la sucesión de eventos volcánicos, donde se identifican claramente las características propias de la Faja Volcánica Transmexicana.

Hacia la base de la columna estratigráfica local se identifican secuencias sedimentarias mesozoicas marinas, los afloramientos más cercanos al parque de los “Prismas Basálticos”, se localizan al norte de Santa María Regla cerca de la ranchería El Huariche en las coordenadas UTM 545361 y 2237802. Sin embargo, los más representativos se localizan más al

norte y noreste en la parte baja del valle del Río Tulancingo, donde afloran claramente las formaciones Méndez y San Felipe de la Cuenca Tampico-Mizantla. Estas rocas conforman la base sobre la cual se depositaron las rocas terciarias de la región (Figura 3) en una superficie de erosión con grandes desniveles de varios cientos de metros de forma irregular, los cuales, muy probablemente son generados a través de fallamiento previo y contemporáneo al vulcanismo.

## 5. ESTRATIGRAFÍA LOCAL

En su mayoría los depósitos son volcánicos, separados por discordancias de erosión acompañadas de eventos piroclásticos. Se ha considerado que el espesor máximo de la sucesión volcánica cubre un desnivel de 1,200 m y fue depositada desde el Plioceno tardío.

La composición de las rocas volcánicas varía desde rocas andesíticas y riolíticas a basálticas derivadas de una gran actividad volcánica, en forma de derrames y depósitos de flujo y escombros que presentan estructuras laminares, interestratificadas y de caída libre, dicha actividad volcánica se considera de edad plioceno tardío; continúa con el intenso vulcanismo pliocuaternario con rocas más básicas asociadas a conos de escoria y flujos de lava y que son los que desarrollan las estructuras prismáticas.

En la cartografía desarrollada para este estudio (Figura 4), se identifican los depósitos asociados al vulcanismo de la Sierra de Las Navajas (Tpl TR-R) y constituido por un complejo volcánico de composición riolítica hiperalcalina, con flujos de lava y domos intercrecidos con depósitos de caída y flujos piroclásticos, así como, grandes flujos de avalancha asociados al colapso del complejo volcánico principal y una gran cantidad de vidrio volcánico (obsidiana negra y dorada, explotada desde épocas precolombinas),

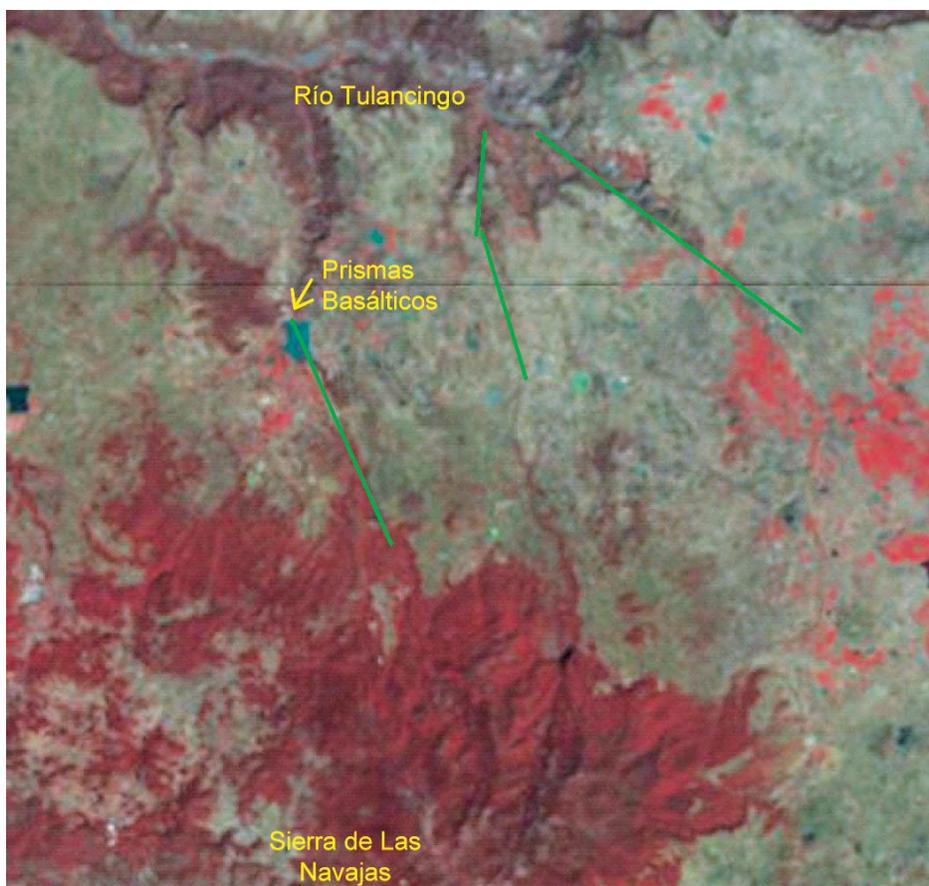


FIGURA 2. Escenas de satélite Spot donde se aprecia el extremo sur de la Sierra de Las Navajas con el colapso parcial del cono principal hacia el norte, desarrollando la peniplanicie volcánica.

algunas veces desvitrificada en niveles esferulíticos, que caracterizan estos depósitos.

Este campo volcánico descansa discordantemente sobre diversas unidades volcánicas hacia la sierra de Pachuca (Sánchez-Rojas et al., 2005) y sobreyace directamente a las formaciones de edad Cretácica tardía en la ranchería de El Huariche y en los cortes del Río Tulancingo.

En esa localidad y en los afloramientos más al norte de la barranca de Alcholya subyace a los derrames y escorias basálticas (Tpl B), pero probablemente se ha interdigitado en realidad con estas rocas, ya que en ocasiones en la barranca del Río Tulancingo y cerca de la Hacienda de Santa María Regla se aprecian niveles de basaltos intercalados con flujos de bloques y cenizas de esta unidad (Fotografía 1).

La Riolita Navajas fue extravasada a través de conductos ahora destruidos por la erosión, ubicados al centro de la Sierra de Las Navajas. El espesor máximo actual de esta unidad en la parte central de su área de afloramiento es del orden de 200 m, con un volumen

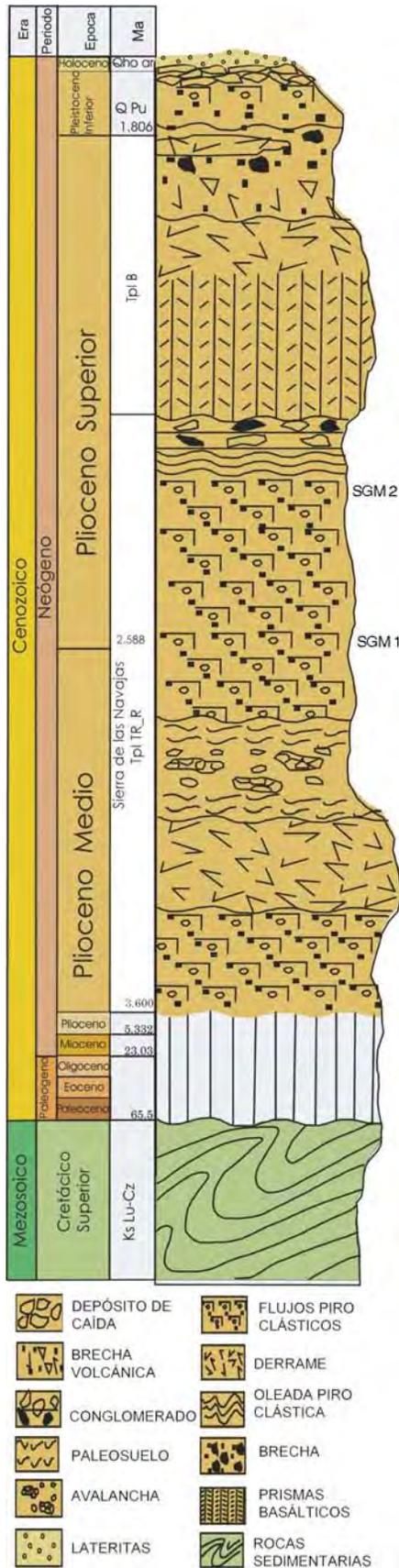


FIGURA 3:  
Columna Estratigráfica



FOTOGRAFÍA 1. Detalle del contacto entre los flujos piroclásticos (Tpl TR-R) y los basaltos y escorias (Tpl B) con un nivel de oleada piroclástica entre ellos.

total extravasado por este campo volcánico de  $35 \pm 10 \text{ km}^3$  (Stephen y Alyson, 1997); sin embargo, dentro del área los cuerpos correspondientes a esta unidad presentan espesores promedio de 120 m, ya que están más alejados de la fuente.

El campo volcánico de la Sierra de Las Navajas, está conformado por derrames de lava color gris claro con buena estructura fluidal y con hileras de vesículas, aunque en ocasiones es densa y sin estructura. Contienen un 5 % de fenocristales hasta de 0.5 mm, tanto de cuarzo como de sanidino. El mineral máfico principal es la hornblenda en forma de cristales prismáticos verdosos, que componen menos del 3 % de la roca. La matriz es cristalina y está compuesta en gran parte por cuarzo y feldespato potásico, que parecen formar un intercrecimiento micrográfico incipiente, en cristales hasta de 0.7 mm en diámetro. Los afloramientos con estructura fluidal y vesículas, contienen niveles de esferulitas y las paredes de las vesículas están tapizadas por cristales de cuarzo y feldespato. El análisis químico de dos muestras corresponde a riolita silícica, con muy bajo contenido de calcio (Sánchez-Rojas *et al.*, 2005).

Algunas de las últimas erupciones del centro volcánico de Las Navajas parecen haber consistido en aludes ardientes compuestos por una matriz de lava vesiculada y fragmentada en tuestos de vidrio, la cual cargaba y transportaba cantidades variables de fragmentos riolíticos, pómez y obsidiana más grandes. En la margen austral de la barranca del Río Tulancingo, aflora un depósito que se interpreta como restos de un alud ardiente, tiene matriz gris compuesta por piroclastos de vidrio incoherentes y con bloques de obsidiana y pómez densa, algunos con estructura de rompecabezas. Bajo este afloramiento los depósitos son coherentes y contienen fragmentos de los mismos tipos de

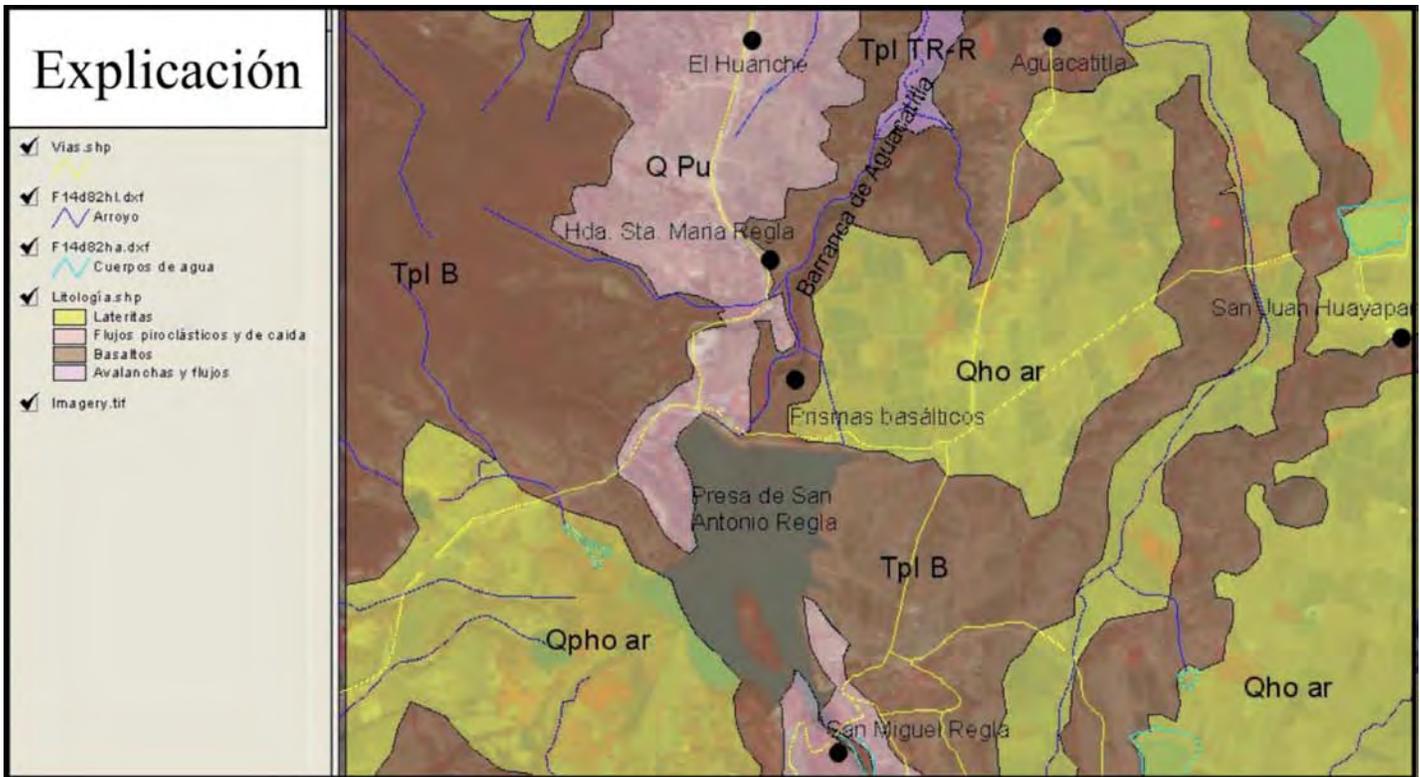


FIGURA 4.  
Plano geológico

obsidiana y de pómez densa, aunque generalmente con menos de 4 cm en diámetro. Los depósitos de alud ardiente o los de flujos piroclásticos de bloques y cenizas ubicados en Santa María Regla, se explotan en canteras para la construcción local, debido a la fácil manipulación de esta roca.

La parte más alta está representada por capas bastante extensas de flujos de escombros y cenizas, intercalados con niveles de oleadas piroclásticas (Fotografía 2) y muy posiblemente de avalancha de escombros en facies de bloques en una zona con orientación de norte a sur desarrollando una peniplanicie volcánica de grandes dimensiones sobre la que se emplazan los basaltos pliocuaternarios del segundo campo volcánico.

Los basaltos (Tpl B) sobreyacen a las unidades anteriores con discordancia angular y sólo están cubiertos por aluvión y el depósito de caída de pómez con flujos piroclásticos (Q Pu).

La sucesión comprende derrames de lava (sólo algunas veces prismatizados), cantidades menores de ceniza y escoria y capas epiclásticas derivadas de los productos eruptivos constituidas por ceniza y lapilli oscura y rojiza, bloques bombas y niveles de escorias, generalmente mezclada con material volcánico erosionado de las formaciones subyacentes. Asimismo, presenta abanicos conformados por flujos de lahares intercalados con depósitos de caída. Los niveles de ceniza se presentan entre y encima de muchos derrames de lava y localmente se encuentra interestratificado material clástico depositado por agua en forma de aluvión y con bolsadas de escorias volcánicas. El color de los basaltos en cortes frescos es variable de gris a gris oscuro, mientras que la roca asume tonos amarillentos, grisáceos y rojizos al intemperismo.

En los derrames, los basaltos se presentan muy vesiculados en la parte inferior, las vesículas son redondas y elípticas de hasta 5 mm de diámetro, espaciadas entre sí, y por lo tanto no producen mucha porosidad en la roca.

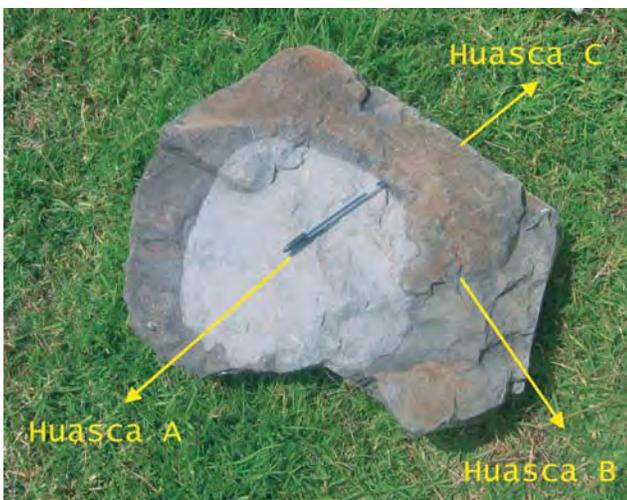
Los afloramientos de derrames volcánicos presentan frecuentemente acantilados de 5 a 25 m de altura, (Fotografía 3) con acumulaciones de talud en su base. La roca tiende a romperse en lascas de 1 a 10 cm de espesor, según planos paralelos a la estructura fluidal.



FOTOGRAFÍA 2. Niveles de oleadas asociadas a flujos piroclásticos en el valle del Río Tulancingo.



FOTOGRAFÍA 3. Niveles de derrames basálticos y escorias (Qpt B) generando cantiles verticales en el valle del Río Tulancingo.



FOTOGRAFÍA 4. Sección de un prisma muestreado, mostrando las partes de donde se laminaron las secciones petrográficas

El cono de escoria más cercano al área de estudio se localiza al noroccidente a menos de 1 km al oriente de la ranhería de Palma Antigua. Casi todos los derrames de lava máfica de la región fueron extravasados a través de conductos en los cerros Alto y Quemado a menos de 2 km al occidente del área, esto es sólo, basado en la erosión y poca definición de estructuras en estos cerros que hace pensar que sean de edad anterior a otros como el cono cercano a Palma Antigua, donde se aprecia un cono de forma más definida.

Los derrames basálticos sobreyacen discordantes sobre conglomerados polimícticos bien clasificados y niveles de areniscas conglomeráticas.

Sobre los basaltos se aprecia otro nivel de depósitos de caída de compuestos principalmente de pómez color crema, flujo piroclástico aflorante sólo en pequeños remanentes cerca de la presa de San Antonio Regla. Estos depósitos de ceniza también se interdigitan con aluvión o están parcialmente cubiertos por ellos.

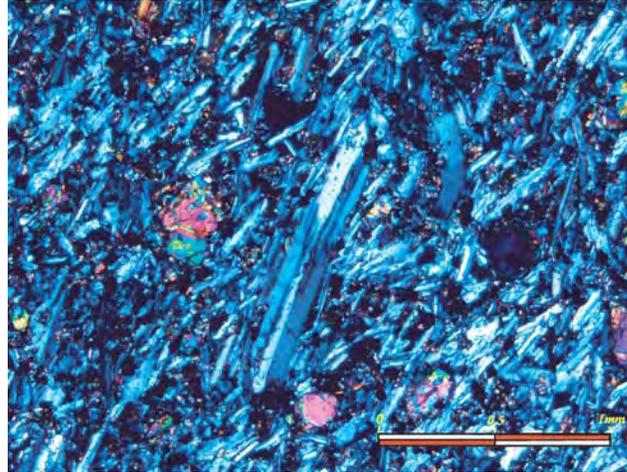
El aluvión y coluvión (Qho al), detectados en el área son pequeños volúmenes de materiales depositados en abanicos aluviales, pies de monte y llanuras de inundación en el valle del Río Tulancingo y partes reducidas de sus tributarios como es el caso de la barranca de Alcholoaya en donde afloran los prismas basálticos. Los depósitos varían desde masivos a bien estratificados. En las tierras peniplanas están constituidos en gran parte por partículas del tamaño de la arena, limo y arcilla y en los abanicos aluviales y pies de monte se forman de grava y bloques mal clasificados.

Las rocas volcánicas no son fácilmente diferenciables en la imagen de satélite; aún con una combinación de bandas de 7,4,1 en el RGB, donde se denotan con mayor claridad los cambios litológicos en la región. Sólo se separa claramente la morfología que desarrollan conjuntamente los aluviones, mientras que los derrames basálticos no se diferencian bien del resto de las rocas volcánicas. Se aprecian claramente algunos conos de escoria como el de Palma Antigua, y se aprecian algunos lineamientos cerca del área en estudio (Figura 2).

## 6. EDAD DEL DEPÓSITO

La única referencia sobre la edad absoluta de estas rocas según Stephen y Alyson (1997) es de  $1.8 \pm 0.4$  Ma calculada por el método de K-Ar pero no especifica si este dato corresponde al nivel prismatizado o a otro.

Para terminar con esta ambigüedad sobre la edad de los derrames asociados a los prismas basálticos se recolectaron dos muestras de roca en dos niveles aflorantes en la margen austral del Río Tulancingo, y marcadas como SGM-1 y SGM-2 (Figura 3). Se determinó su edad por el método de K-Ar en el Instituto de Geología de la UNAM, cuyos resultados reflejan que hay un ligero cambio entre los dos niveles, ya que la muestra SGM-1 posee mayor concentración de K y mayor proporción de Ar radiogénico. La edad del derrame que generó la prismatización es de  $2.58 \pm 0.15$  Ma (Tabla 1), por lo que corresponde al límite del Piacenciano y el Gelasiano en la parte media-superior del Plioceno (Gradstein *et al.*, 2006).



FOTOGRAFÍA 5. Fotomicrografía a 2.5 X donde se puede observar un cristal de plagioclasa (Plg) con macla tipo carlsbad.

| Muestra | Material    | Peso (mg) | %K   | <sup>40</sup> Ar <sub>rad</sub> (moles/g) | % <sup>40</sup> Ar <sub>rad</sub> | Edad (Ma)       |
|---------|-------------|-----------|------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| SGM-1   | Roca entera | 20.496    | 2.82 | $1.262 \times 10^{-11}$                   | 50.3                              | $2.58 \pm 0.15$ |
| SGM-2   | Roca entera | 20.588    | 1.69 | $6.719 \times 10^{-12}$                   | 31.2                              | $2.29 \pm 0.23$ |

TABLA 1. Análisis Isotópico por K-Ar.

## 7. CLASIFICACIÓN DE LOS BASALTOS

Al examinar con lupa las muestras de mano de los derrames basálticos, resalta la presencia de pequeños cristales anhedrales de olivino escasamente esparcidos en una matriz afanítica, aunado a esto, la mineralogía y el aspecto denso y oscuro de la roca, sugieren que la clasificación de campo para esta roca sea la de basalto. Para el análisis petrográfico de las rocas que comprenden los Prismas Basálticos se tomó una muestra cerca de la Hacienda de Santa María Regla en las siguientes coordenadas:  $20^{\circ} 13' 11.66''$  N,  $98^{\circ} 33' 34.35''$  W. De esta muestra se realizaron tres laminas delgadas con el objetivo de observar las diferencias texturales que nos permitieran indicar variaciones en el grado de enfriamiento que originó la prismatización (Fotografía 4).

### DESCRIPCIÓN MEGASCÓPICA

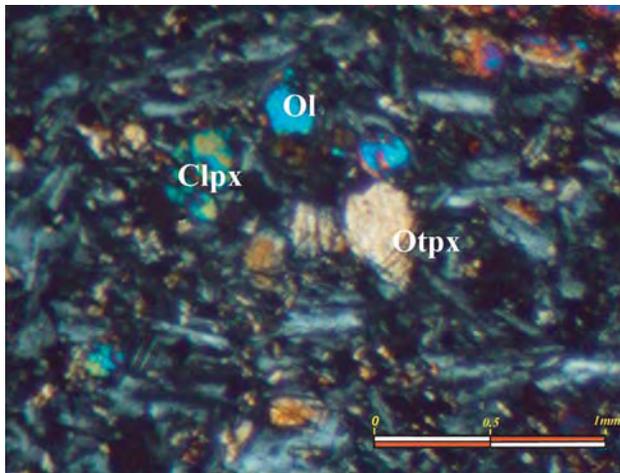
El prisma cambia su tonalidad de gris oscuro en la orilla a gris más claro en la parte central, posiblemente por procesos de intemperismo concéntrico y asociado a los cambios texturales de la roca. Su composición es básica y su textura afanítica.

Se observan minerales muy finos de plagioclasa, piroxeno, olivino y minerales oxidados. La oxidación del prisma se presenta más fuerte en las orillas, mientras que en la parte central la oxidación es menor. La muestra se clasifica como roca ígnea extrusiva de composición basáltica.

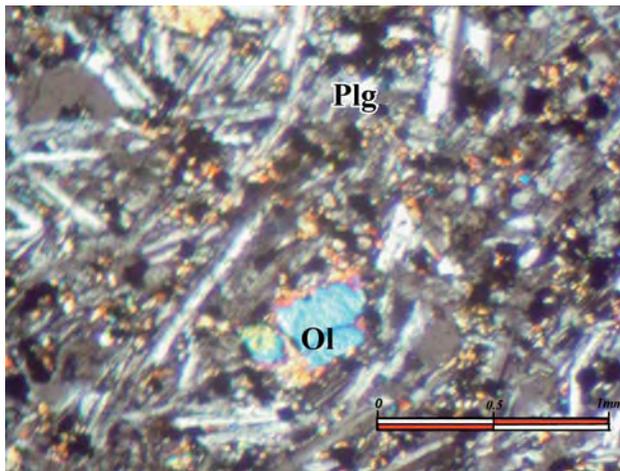
### DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

De la muestra obtenida se realizaron tres láminas de diferentes partes del prisma, cuya descripción petrográfica se describe a continuación:

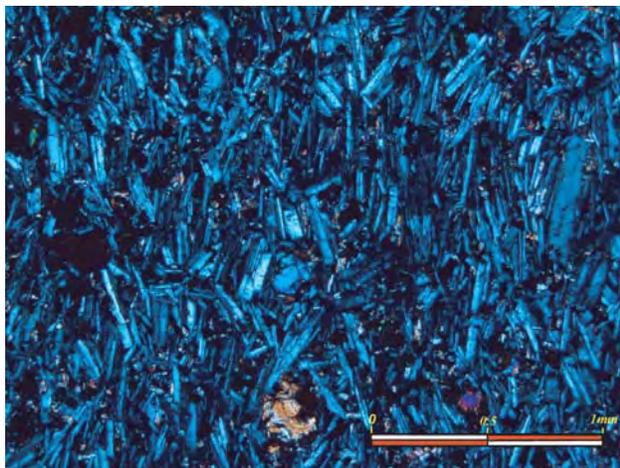
**HUASCA A:** La muestra a escala microscópica presenta un grado de cristalinidad holocristalina, constituida por fenocristales de plagioclasas (70%), piroxenos (8%), olivinos (3%) y minerales opacos (7%), de dimensiones que van desde 0.03 a 1.3 mm rodeados por una matriz conformada por microlitos de plagioclasas y piroxenos dando un total de 12% de volumen.



FOTOGRAFÍA 6. Fotomicrografía a 2.5 X donde se observan cristales de olivino (Ol), clinopiroxeno (Clpx), ortopiroxeno (Otpx) y microlitos de plagioclasa, también se puede observar la textura intergranular.



FOTOGRAFÍA 7. Fotomicrografía a 2.5 X donde se observan los óxidos de Fe y Ti ocupando espacios entre las fases minerales, también se ven cristales de olivino (Ol), fenocristales y microlitos de plagioclasa (Plg), también se puede observar la textura intergranular.



FOTOGRAFÍA 8. Fotomicrografía a 2.5 X donde se puede observar la textura porfídica traquítica y microlitos de plagioclasa.

El arreglo de componentes le da a la roca una textura porfírica intergranular, en donde los intersticios entre las plagioclasas se encuentran ocupados por ferromagnesianos, generalmente olivino, piroxeno y minerales opacos (Fotografía 5). La muestra se clasifica como una roca máfica con composición mineral de basalto rico en plagioclasas.

**PLAGIOCLASA:** Es la fase mineral más abundante con un porcentaje de 70%, se encuentra como fenocristales que varían en dimensiones desde 0.5 a 1.3 mm (10%) y microfenocristales que varían 0.03 a 0.2 mm (60%). Con base en su ángulo de extinción que varía de 34° a 43° se determinó que se presentan minerales de Labradorita y Bitownita, de forma subhedral con maclas de tipo Carlsbad. Algunos cristales presentan en sus bordes una coloración rojiza como una ligera oxidación (Fotografía 5).

Los piroxenos se encuentran en un volumen de 8%, divididos en ortopiroxenos (5%) de forma subhedral con dimensiones que van desde fenocristales < 0.7 mm a microfenocristales de dimensiones de 0.3 mm de color amarillo que muestran un ligero pleocroísmo. Los clinopiroxenos se encuentran en un porcentaje de 3%, de forma subhedral y con dimensiones de microfenocristales de 0.3 mm, color verde, con pleocroísmo muy ligero. Se observa un clivaje de 90° (Fotografía 6).

Los óxidos de Fe y Ti se presentan en un porcentaje de 12%, de color rojizo, forma anhedral y con dimensiones de 0.2 mm (microfenocristales).

Algunos óxidos se encuentran en forma de bordes de reacción de los piroxenos y como inclusiones en olivinos, plagioclasas y piroxenos. En forma general se encuentran ocupando espacios en las fases minerales distribuidos en toda la roca (Fotografía 7).

El olivino se encuentra en un porcentaje de 3% de forma subhedral, color azul, de 0.8 mm (fenocristales), con fractura concoidea, algunos minerales de olivino se observan rodeados de microcristales de clinopiroxeno.

**HUASCA B:** La muestra a escala microscópica presenta un grado de cristalinidad holocristalina constituida completamente por fenocristales de plagioclasa (52%), piroxeno (8%), olivino (5%) y minerales opacos (16%) de dimensiones que van desde 0.03 a 1.7 mm, rodeados por una matriz de microlitos de plagioclasa y piroxeno con un porcentaje de 19%.

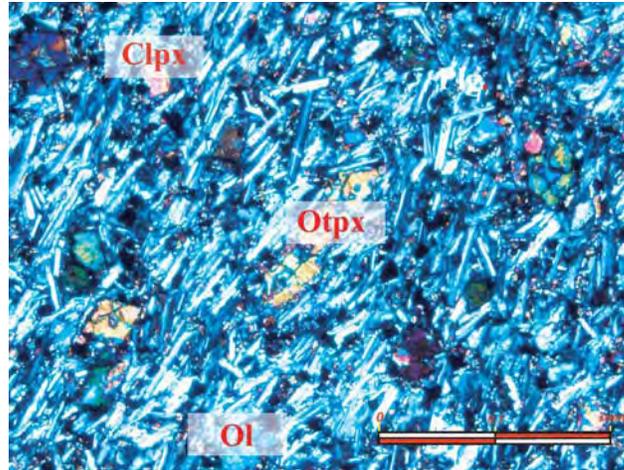
El arreglo de componentes le da a la roca una textura porfídica traquítica, las plagioclasas están dispuestas en una forma subparalela como resultado del flujo y sus intersticios están ocupados por microcristales de piroxeno, olivino y óxidos de Fe principalmente (Fotografía 8).

La muestra se clasifica como una roca máfica con composición mineralógica de basalto.

**PLAGIOCLASA:** Esta fase mineral se presenta en un porcentaje de 52%, como fenocristales que varían en dimensiones de 0.5 a 0.7 mm (5%) y microfenocristales que varían de 0.03 a 0.1 mm (47%), con base en su ángulo de extinción que varía de 27° a 39° se determinó que es Labradorita y Bitownita. Se presenta de forma euhedral con maclas tipo Carlsbad, en estos minerales se puede observar una coloración rojiza de oxidación en sus bordes (Fotografía 9).

Los piroxenos se encuentran en un porcentaje de 8%; los ortopiroxenos anhedral (5%) con dimensiones de 0.03 a 0.05 mm (microfenocristales), de color naranja con un ligero pleocroísmo. Los clinopiroxenos se encuentran en un porcentaje de 3%, de forma subhedral con tamaños que varían entre 0.03 y 0.5 mm (microfenocristales), son de color verde, con un ligero pleocroísmo, algunos piroxenos también presentan bordes de reacción de color rojizo.

Los olivinos se encuentran en forma subhedral y representan el 5%, con dimensiones de 0.03 mm (microfenocristales), estos minerales se observan muy alterados con fractura concoidea, algunos minerales de



FOTOGRAFÍA 9. Fotomicrografía con aumento a 2.5 X donde se observan fenocristales y microfenocristales de olivino (Ol), ortopiroxeno (Otpx), clinopiroxenos (Clpx) y microlitos de Plagioclasa (Plg).

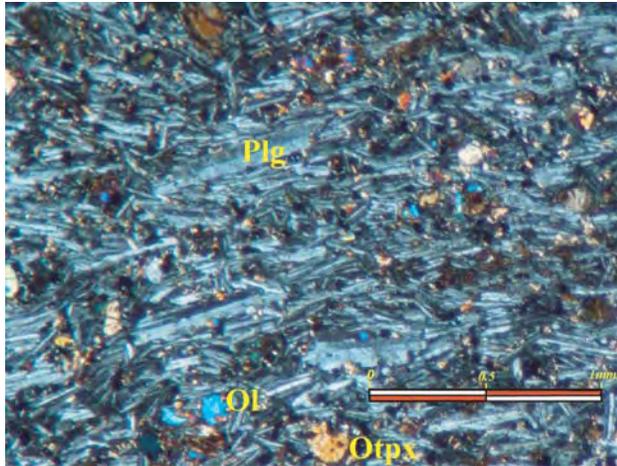
olivino presentan bordes de reacción de óxido de hierro posiblemente reaccionando a ignincita.

Los óxidos de Fe y Ti se presentan en un porcentaje de 16%, de color rojizo y forma anhedral. La mayoría de estos óxidos se encuentran bordeando algunos minerales y en otros casos se encuentran en la matriz y como inclusiones de plagioclasas, olivinos y minerales opacos. En forma general se encuentran ocupando espacios en las fases minerales distribuidos en la roca. La mayoría de los cristales de piroxeno y olivino se observan muy alterados.

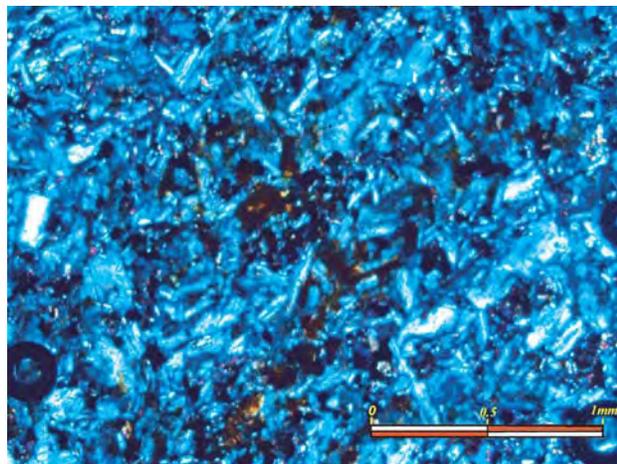
**HUASCA C:** La muestra a escala microscópica presenta un grado de cristalinidad holocristalina constituida en su mayoría por microfenocristales de plagioclasa (68%), piroxeno (7%), olivino (2%) y minerales opacos (10%) de dimensiones que van de 0.03 a 0.5 mm, rodeados por una matriz de microlitos de plagioclasa y piroxeno conformando el 13% del total de la muestra (Fotografía 10).

En general, esta muestra es la más alterada de las tres y cabe señalar que en esta lámina se observan las plagioclasas más pequeñas que las muestras anteriores.

El arreglo de componentes le da a la roca una textura Porfídica traquítica, en donde las plagioclasas están dispuestas en una forma subparalela como resultado del flujo y sus intersticios están ocupados por microcristales de piroxenos, olivinos y óxidos de Fe principalmente.



FOTOGRAFÍA 10. Fotomicrografía a 2.5 X donde se observan Microfenocristales de olivino (Ol), ortopiroxenos (Otpx), minerales alterados por óxidos de Fe y Ti y microlitos de plagioclasa (Plg) y piroxenos.



FOTOGRAFÍA 11. Fotomicrografía con aumento a 2,5 X donde se observa la alteración que representan los cristales de óxido de Fe y Ti.

La muestra se clasifica petrográficamente como una roca máfica de composición mineralógica de Basalto.

Las plagioclasas se presentan en un porcentaje de 68%, se encuentran como fenocristales que varían en dimensiones desde 0.6 a 0.08 mm (5%) y microfenocristales que varían desde 0.03 a 0.2 mm (63%); con base en su ángulo de extinción que varía de 33° a 41° se clasificó como Labradorita y Bitownita, se presentan en forma subhedral con maclas tipo Carlsbad.

PIROXENOS: Esta fase se presenta en un porcentaje de 7%, siendo 5% clinopiroxenos anhedrales con dimensiones de 0.05 mm (microfenocristales) de color verde y con ligero pleocroismo, los ortopiroxenos en un porcentaje de 2% de forma subhedral con dimensiones de 0.2 mm (microfenocristales), de color verde y ligero pleocroismo.

Los olivinos se observan en un porcentaje de 2% de volumen, de forma subhedral y tamaño de 0.03 mm (microfenocristales), color azul, con fractura concoidea. La mayoría de estos minerales se observan alterados con óxido de hierro de color rojizo en sus bordes posiblemente reaccionando a ignicitia.

Se observan óxidos de Fe y Ti, en un porcentaje de 10%, de color rojizo alterando a los minerales de plagioclasa y olivinos principalmente; se presenta ocupando espacios entre las fases minerales (Fotografía 11).

Las clasificaciones y análisis anteriores de la roca que conforman los prismas, han dado una clasificación petrográfica de basalto con variaciones en su textura, porcentaje de minerales y grado de intemperismo. Como complemento a esta clasificación se realizó un análisis químico (Tabla 2), que denota un contenido alto en alúmina, así como contenidos relativamente bajos en calcio y magnesio, en comparación con la gran mayoría de las rocas basálticas reportadas en la literatura (Sánchez-Rojas *et al.*, 2003; Stephen y Alyson, 1997; Geyne *et al.*, 1965).

| IDENTIFICACION | ELEMENTO/COMUESTO |                  |                                |                                |       |       |       |       |                   |                  |                               |
|----------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|
|                | SiO <sub>2</sub>  | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO   | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| HUASCA A       | 50.03             | 2.35             | 18                             | 9.093                          | 1.029 | 0.159 | 6.035 | 8.115 | 4.354             | 0.959            | 0.474                         |
| HUASCA B       | 49.2              | 2.36             | 17.29                          | 9.022                          | 1.029 | 0.164 | 5.721 | 7.794 | 4.057             | 0.923            | 0.467                         |
| HUASCA C       | 49.03             | 2.269            | 17.57                          | 8.578                          | 0.901 | 0.142 | 4.544 | 8.591 | 4.165             | 0.944            | 0.479                         |

Tabla 2. Resultados de análisis químicos para roca total en tres niveles concéntricos de un prisma basáltico.

Realizando un análisis normativo de la muestra Huasca A, se obtuvo su clasificación según la serie de óxidos con y sin corrección, así como su determinación de componentes minerales según su análisis normativo y las características del magma que dio origen a la roca como son su contenido en hierro, álcalis y magnesio, las relaciones entre ellos, la diferenciación magmática, densidad, viscosidad, temperatura de emplazamiento y contenido acuoso del magma (Tabla 3).

Lo mismo se calculó para la muestra Huasca B (Tabla 4) y para la muestra Huasca C (Tabla 5). Con estos análisis se realizó una gráfica para determinar la clasificación más exacta de la roca (Tabla 6), obteniendo que entra en el grupo del basalto y traquibasalto, lo anterior sugiere que la clasificación química para esta roca coincide con la clasificación realizada en campo y el análisis petrográfico antes referidos.

| Rock Analysis |         | Correction Factors  |       | Corrected Analysis | Normative Minerals        | Weight % Norm | Volume % Norm |
|---------------|---------|---------------------|-------|--------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| SiO2          | 50.03 % | Total=100%? Y/N     | Y     | 49.73              | Quartz                    |               |               |
| TiO2          | 2.35 %  | Fe3+/(Total Iron)   |       | 2.34               | Plagioclase               | 63.21         | 69.25         |
| Al2O3         | 18.00 % |                     |       | 17.89              | Orthoclase                | 5.61          | 6.43          |
| Fe2O3         | 9.09 %  | Total Fe as FeO     | 9.21  | 9.04               | Nepheline                 |               |               |
| FeO           | 1.03 %  | Desired Fe2O3       | 9.09  | 1.02               | Leucite                   |               |               |
| MnO           | 0.16 %  | Desired FeO         | 1.03  | 0.16               | Kalsilite                 |               |               |
| MgO           | 6.04 %  | Weight corr. factor | 0.994 | 6.00               | Corundum                  |               |               |
| CaO           | 8.12 %  |                     |       | 8.07               | Diopside                  | 5.31          | 4.84          |
| Na2O          | 4.35 %  |                     |       | 4.33               | Hypersthene               | 6.61          | 6.04          |
| K2O           | 0.96 %  |                     |       | 0.95               | Wollastonite              |               |               |
| P2O5          | 0.47 %  |                     |       | 0.47               | Olivine                   | 4.12          | 3.75          |
| CO2           | %       |                     |       |                    | Larnite                   |               |               |
| SO3           | %       |                     |       |                    | Acmite                    |               |               |
| S             | %       |                     |       |                    | K2SiO3                    |               |               |
| F             | %       |                     |       |                    | Na2SiO3                   |               |               |
| Cl            | %       |                     |       |                    | Rutile                    |               |               |
| Sr            | ppm     |                     |       |                    | Ilmenite                  | 2.50          | 1.54          |
| Ba            | ppm     |                     |       |                    | Magnetite                 |               |               |
| Ni            | ppm     |                     |       |                    | Hematite                  | 9.04          | 5.05          |
| Cr            | ppm     |                     |       |                    | Apatite                   | 1.09          | 1.00          |
| Zr            | ppm     |                     |       |                    | Zircon                    |               |               |
| Total         | 100.60  |                     |       | 100.00             | Perovskite                |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Chromite                  |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Sphene                    | 2.52          | 2.11          |
|               |         |                     |       |                    | Pyrite                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Halite                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Fluorite                  |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Anhydrite                 |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Na2SO4                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Calcite                   |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Na2CO3                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Total                     | 100.01        | 100.01        |
|               |         |                     |       |                    | Fe3+/(Total Fe) in rock   | 88.9          | 88.9          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Total Fe) in rock  | 53.9          | 53.9          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Fe2+) in rock      | 91.3          | 91.3          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Fe2+) in silicates | 100.0         | 100.0         |
|               |         |                     |       |                    | Ca/(Ca+Na) in rock        | 50.7          | 50.7          |
|               |         |                     |       |                    | Ca/(Ca+Na) in plagioclase | 40.6          | 40.6          |
|               |         |                     |       |                    | Differentiation Index     | 68.6          | 75.7          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated density, g/cc  | 2.93          | 2.93          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated liquid density | 2.61          | 2.61          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated viscosity, dry | 2.3           | 2.3           |
|               |         |                     |       |                    | Calculated viscosity, wet | 2.2           | 2.2           |
|               |         |                     |       |                    | Estimated liquidus temp.  | 1218          | 1218          |
|               |         |                     |       |                    | Estimated H2O content     | 0.36          | 0.36          |

Tabla 3. Análisis normativo de la muestra Huasca A.

## 8. GÉNESIS DE LOS BASALTOS COLUMNARES

Debido a que uno de los principales objetivos de este estudio fue determinar el origen y desarrollo de los prismas columnares en Santa María Regla, uno de los primeros pasos, como se mencionó anteriormente, fue la exhaustiva recopilación bibliográfica sobre estas estructuras; la gran mayoría de los trabajos consultados se enfocan en la génesis de los magmas y depósitos volcánicos y sólo hacen una descripción de las estructuras sin tocar los mecanismos para su desarrollo, de tal forma que en varios de ellos se nota una evidente controversia. En algunos estudios atribuyen la formación de estos prismas a enfriamiento rápido del magma, mientras que otros argumentan enfriamiento lento, estos últimos sin dar argumentos.

| Rock Analysis |         | Correction Factors  |       | Corrected Analysis | Normative Minerals        | Weight % Norm | Volume % Norm |
|---------------|---------|---------------------|-------|--------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| SiO2          | 49.12 % | Total=100%? Y/N     | Y     | 50.57              | Quartz                    | 0.47          | 0.52          |
| TiO2          | 2.25 %  | Fe3+/(Total Iron)   |       | 2.32               | Plagioclase               | 63.16         | 68.99         |
| Al2O3         | 17.50 % |                     |       | 18.02              | Orthoclase                | 5.79          | 6.62          |
| Fe2O3         | 8.52 %  | Total Fe as FeO     | 8.57  | 8.77               | Nepheline                 |               |               |
| FeO           | 0.90 %  | Desired Fe2O3       | 8.52  | 0.93               | Leucite                   |               |               |
| MnO           | 0.14 %  | Desired FeO         | 0.90  | 0.15               | Kalsilite                 |               |               |
| MgO           | 4.51 %  | Weight corr. factor | 1.030 | 4.54               | Corundum                  |               |               |
| CaO           | 8.63 %  |                     |       | 8.89               | Diopside                  | 7.64          | 6.94          |
| Na2O          | 4.13 %  |                     |       | 4.25               | Hypersthene               | 8.02          | 7.31          |
| K2O           | 0.95 %  |                     |       | 0.98               | Wollastonite              |               |               |
| P2O5          | 0.47 %  |                     |       | 0.49               | Olivine                   |               |               |
| CO2           | %       |                     |       |                    | Larnite                   |               |               |
| SO3           | %       |                     |       |                    | Acmite                    |               |               |
| S             | %       |                     |       |                    | K2SiO3                    |               |               |
| F             | %       |                     |       |                    | Na2SiO3                   |               |               |
| Cl            | %       |                     |       |                    | Rutile                    |               |               |
| Sr            | ppm     |                     |       |                    | Ilmenite                  | 2.29          | 1.41          |
| Ba            | ppm     |                     |       |                    | Magnetite                 |               |               |
| Ni            | ppm     |                     |       |                    | Hematite                  | 8.77          | 4.89          |
| Cr            | ppm     |                     |       |                    | Apatite                   | 1.14          | 1.04          |
| Zr            | ppm     |                     |       |                    | Zircon                    |               |               |
| Total         | 97.13   |                     |       | 100.01             | Perovskite                |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Chromite                  |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Sphene                    | 2.74          | 2.29          |
|               |         |                     |       |                    | Pyrite                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Halite                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Fluorite                  |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Anhydrite                 |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Na2SO4                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Calcite                   |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Na2CO3                    |               |               |
|               |         |                     |       |                    | Total                     | 100.02        | 100.01        |
|               |         |                     |       |                    | Fe3+/(Total Fe) in rock   | 89.5          | 89.5          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Total Fe) in rock  | 48.4          | 48.4          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Fe2+) in rock      | 89.9          | 89.9          |
|               |         |                     |       |                    | Mg/(Mg+Fe2+) in silicates | 100.0         | 100.0         |
|               |         |                     |       |                    | Ca/(Ca+Na) in rock        | 53.6          | 53.6          |
|               |         |                     |       |                    | Ca/(Ca+Na) in plagioclase | 41.6          | 41.6          |
|               |         |                     |       |                    | Differentiation Index     | 69.4          | 76.1          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated density, g/cc  | 2.93          | 2.93          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated liquid density | 2.60          | 2.60          |
|               |         |                     |       |                    | Calculated viscosity, dry | 2.6           | 2.6           |
|               |         |                     |       |                    | Calculated viscosity, wet | 2.5           | 2.5           |
|               |         |                     |       |                    | Estimated liquidus temp.  | 1203          | 1203          |
|               |         |                     |       |                    | Estimated H2O content     | 0.42          | 0.42          |

Tabla 4. Análisis normativo de la muestra Huasca B.

Norm Calculation Program  
Sample Number: HUASCA B  
Program run: 31/08/2007

| Rock Analysis | Correction Factors        | Corrected Analysis | Normative Minerals | Weight % Norm | Volume % Norm |
|---------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|
| SiO2 49.20 %  | Total=100%? Y/N Y         | 50.25              | Quartz             | 0.22          | 0.25          |
| TiO2 2.24 %   | Fe3+/(Total Iron)         | 2.28               | Plagioclase        | 61.86         | 67.94         |
| Al2O3 17.29 % | Total Fe as FeO 9.15      | 17.66              | Orthoclase         | 5.56          | 6.38          |
| Fe2O3 9.02 %  | Desired Fe2O3 9.02        | 9.22               | Nephele            |               |               |
| FeO 1.03 %    | Desired FeO 1.03          | 1.05               | Leucite            |               |               |
| MnO 0.18 %    | Weight corr. factor 1.021 | 0.17               | Kalsilite          |               |               |
| MgO 5.72 %    | Zero values not shown     | 5.84               | Corundum           |               |               |
| CaO 7.79 %    | Norm calculation checks:  | 7.96               | Diopside           | 4.92          | 4.50          |
| Na2O 4.06 %   | Norm seems OK             | 4.14               | Hypersthene        | 12.27         | 11.24         |
| K2O 0.92 %    |                           | 0.94               | Wollastonite       |               |               |
| P2O5 0.47 %   |                           | 0.48               | Olivine            |               |               |
| CO2 %         |                           |                    | Larnite            |               |               |
| SO3 %         |                           |                    | Acmite             |               |               |
| S %           |                           |                    | K2SiO3             |               |               |
| F %           |                           |                    | Na2SiO3            |               |               |
| Cl %          |                           |                    | Rutile             |               |               |
| Sr ppm        |                           |                    | Ilmenite           | 2.56          | 1.60          |
| Ba ppm        |                           |                    | Magnetite          |               |               |
| Ni ppm        |                           |                    | Hematite           | 9.22          | 5.17          |
| Cr ppm        |                           |                    | Apatite            | 1.11          | 1.02          |
| Zr ppm        |                           |                    | Zircon             |               |               |
| Total 97.90   |                           | 99.99              | Perovskite         |               |               |
|               |                           |                    | Chromite           |               |               |
|               |                           |                    | Sphene             | 2.26          | 1.90          |
|               |                           |                    | Pyrite             |               |               |
|               |                           |                    | Halite             |               |               |
|               |                           |                    | Fluorite           |               |               |
|               |                           |                    | Anhydrite          |               |               |
|               |                           |                    | Na2SO4             |               |               |
|               |                           |                    | Calcite            |               |               |
|               |                           |                    | Na2CO3             |               |               |
|               |                           |                    | Total              | 100.00        | 100.00        |

Fe3+/(Total Fe) in rock 88.8 88.8  
Mg/(Mg+Total Fe) in rock 52.7 52.7  
Mg/(Mg+Fe2+) in rock 90.8 90.8  
Mg/(Mg+Fe2+) in silicates 100.0 100.0  
Ca/(Ca+Na) in rock 51.5 51.5  
Ca/(Ca+Na) in plagioclase 41.9 41.9  
Differentiation Index 67.6 74.6  
Calculated density, g/cc 2.94 2.94  
Calculated liquid density 2.61 2.61  
Calculated viscosity, dry 2.4 2.4  
Calculated viscosity, wet 2.3 2.3  
Estimated liquidus temp. 1209 1209  
Estimated H2O content 0.40 0.40

This program was written by Kurt Hollochier, Geology Department, Union College, Schenectady, NY, 12308, hollochier@union.edu

Tabla 5. Análisis normativo de la muestra Huasca C.

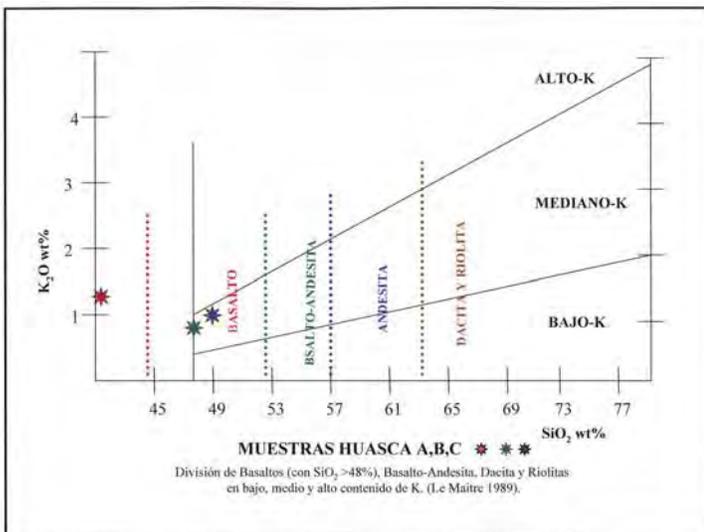


Tabla 6. Clasificación normativa de la roca prismatizada.

Cabe mencionar que son mucho más frecuentes y confiables las referencias asociadas a enfriamiento rápido del magma ya sea por un cuerpo acuoso o congelado; y su origen está más relacionado al cambio de volumen denotado por el enfriamiento rápido pero dentro de un cuerpo de magma confinado, en donde la contracción de volumen no puede darse por aplastamiento o compactación del cuerpo magmático al enfriarse, como sucede en superficie con una corriente de lava, un lahar o un flujo piroclástico.

Los prismas no sólo son desarrollados en el basalto sino también en otro tipo de depósitos magmáticos como en sills, diques y pequeñas intrusiones así como en depósitos de caída subacuosa, en ignimbritas, y también en otro tipo de materiales como areniscas, lodo, carbón, vidrio y aún hielo, dependiendo si el gradiente de contracción es generado por un proceso de enfriamiento o por desecación, Weinberger, 2001.

Los elementos dimensionales de los prismas de Santa María Regla, varían en diámetro (d) desde unos centímetros hasta 1.5 metros, generalmente son verticales, aunque las hay curvadas horizontales y con alturas (l) hasta de 30 metros, cada estría desarrollada por un proceso de tensión (c) individual en general presenta de 30 a 60 cm. (Figura 5 y Fotografía 12).

Se han documentado prismatizaciones en casi todo nuestro planeta y hasta en Marte, asociadas a lagos congelados y permafrost en Groenlandia, intrusiones como en Devils Tower en Wyoming, lagos como en Devils Postpile en California y líneas costeras como en la calzada del Gigante en Irlanda del Norte, la cual fue declarada Patrimonio de la Humanidad en 1986 y Reserva Natural Nacional en 1987 (Schaefer y Kattenhorn 2004, Vidal et al., 2007, Jeong et al., 2005).

Las juntas columnares son redes tridimensionales de fracturas planares y a veces

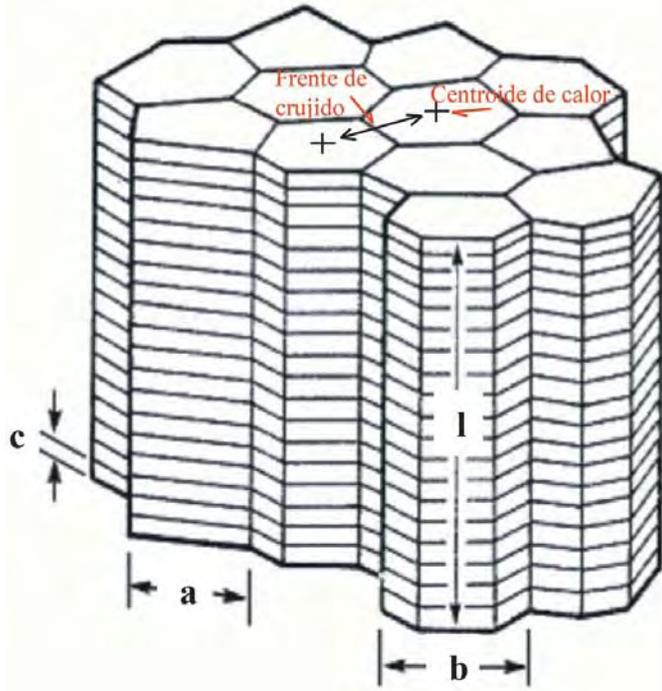


FIGURA 5. Elementos dimensionales:  
 a = cara de la columna    b = diámetro  
 c = fractura de tensión    l = longitud del prisma

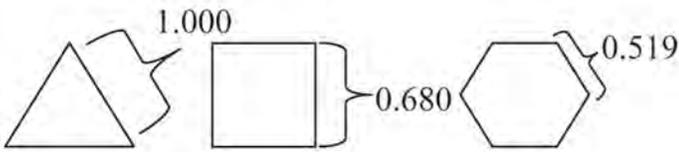


FIGURA 6. Esfuerzo requerido para el desarrollo de un crack dependiendo el número de caras de un elemento geométrico.

cóncavas que desarrollan prismas, cuya sección aunque suele ser hexagonal, también se pueden encontrar de tres y hasta ocho lados.

La razón por la que generalmente se desarrolla la sección hexagonal en la naturaleza es, según experimentos de Mallet (1874), porque bajo esta forma el esfuerzo requerido por las superficies de crujimiento es menor que con otras figuras geométricas, que por tener menos lados requieren por cada una de sus superficies mayor cantidad de esfuerzo para desarrollarse. Dicho de otro modo, el nivel de esfuerzo y energía necesarios para que se genere una diaclasa entre dos puntos es inversamente proporcional al número de caras del prisma, ya que entre más números de caras tenga un prisma, el área de la cara de la columna (a) a formarse es menor y requiere de menor esfuerzo, razón por la que los prismas adquieren preferentemente la forma hexagonal (Figura 6).

Con base en diferentes experimentos realizados en laboratorio (Goehring y Morris, 2004, Toramaru y Matsumoto, 2004) con almidón y agua, en los que el gradiente de desecación es correspondiente al gradiente de contracción del basalto por enfriamiento para la formación de columnas prismáticas, se han definido las siguientes relaciones: el área de una sección transversal de la columna es inversamente proporcional al gradiente de enfriamiento; sin embargo, para el desarrollo de este fenómeno hay que considerar factores como la elasticidad, coeficiente del crecimiento de grieta, la extensión termal, la temperatura de transición de cristal, y el cociente de la densidad de la grieta en el máximo de la tensión. Estos factores definen un punto crítico debajo del cual el empalme de columnas no se desarrolla. Por último se define que entre más alto sea el gradiente de enfriamiento la forma preferida de la columna es un pentágono, mientras que



FOTOGRAFÍA 12. Detalle de las columnas prismáticas en el parque recreativo de Santa María Regla en donde se aprecian varios de sus elementos dimensionales  
 a = cara de la columna, c = fractura de tensión,  
 l = longitud del prisma.

en un gradiente más bajo la forma desarrollada es un hexágono.

También se han desarrollado diferentes estudios que mediante modelos y algoritmos matemáticos intentan representar y entender este fenómeno. El más conocido es el de Grossenbacher y McDuffie, (1995), en donde se relaciona el desarrollo de estas formas prismáticas con el proceso de nucleación de vértices polinomiales, a partir de un centroide conocido como VOPONUCE (Voronoi polynomial nucleated on the centroid) que desarrollan al contraerse un frente de crujido o fractura de distensión por encogimiento en el punto más alejado de un centro de calor (Figura 5 y Fotografía 13).

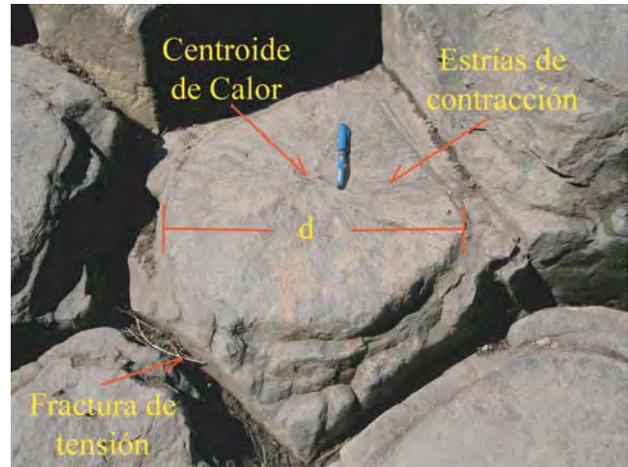
De este primer crujido en el punto más cercano a la fuente de enfriamiento o punto de disparo, se continúa el proceso en secciones y que desarrolló su propia fractura de tensión (c) se van conformando poco a poco las caras de los prismas desde la fuente de enfriamiento donde se genera el esfuerzo tensionante ( $T^M$ ) hasta el punto más alejado de la fuente de enfriamiento (Goehring y Morris, 2004) (Figura 7).

De estos experimentos (Muller, 1998) y las relaciones observadas en las diferentes prismatizaciones en todo el mundo se desprende que:

Necesariamente están relacionados con una entrada de agua que fluyó durante meses y años por arriba del derrame e intervino en el enfriamiento del cuerpo lávico aislado.

El desarrollo de las columnas pudo ser afectado por la temperatura y homogeneidad en la composición del magma así como las dimensiones del depósito. El crecimiento de las columnas es perpendicular a la superficie del flujo por lo que las más comunes son verticales.

El enfriamiento del magma debe ser por una o varias superficies arriba y abajo del cuerpo



FOTOGRAFÍA 13. Detalle de una sección columnar en el parque recreativo de Santa María Regla en donde se aprecian elementos como  $d$  = diámetro de la columna, centroide de calor (VOPONUCE), estrías de contracción concéntricas y fractura de tensión.



FOTOGRAFÍA 14. Detalle de la parte superior del derrame prismatizado donde se aprecia el desarrollo de una capa amorfa de basalto que aisló el resto del magma que así pudo prismatizarse.

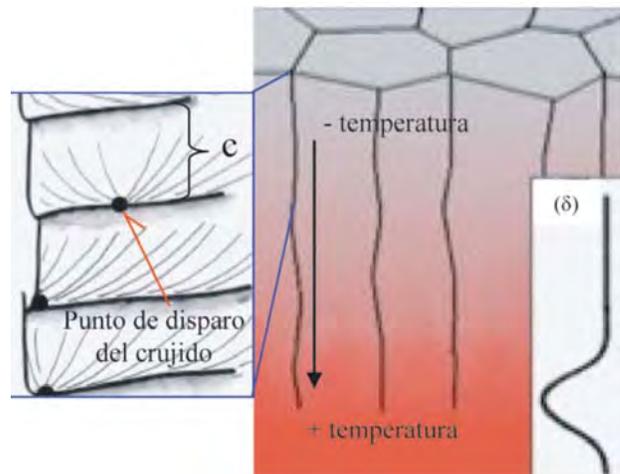


Figura 7. Distribución del esfuerzo tensionante (a) asociado al enfriamiento rápido y detalle del proceso de crujido dentro de cada fractura de tensión.

lávico, el cual mientras aún es plástico por el calor, inicia una contracción que desarrolla esfuerzos internos, así como subsidencia de la superficie superior; a una temperatura entre 900° y 600°F, el magma se empieza a fraccionar y comienzan a desarrollarse frentes de crujido de encogimiento entre dos puntos de calor (VOPONUCE), que evolucionan hasta formar superficies de separación que serán cada vez más continuas aumentando su área y volumen de separación hasta formar las fracturas de tensión, que al evolucionar se unen entre sí, desarrollando las caras de las columnas prismáticas.

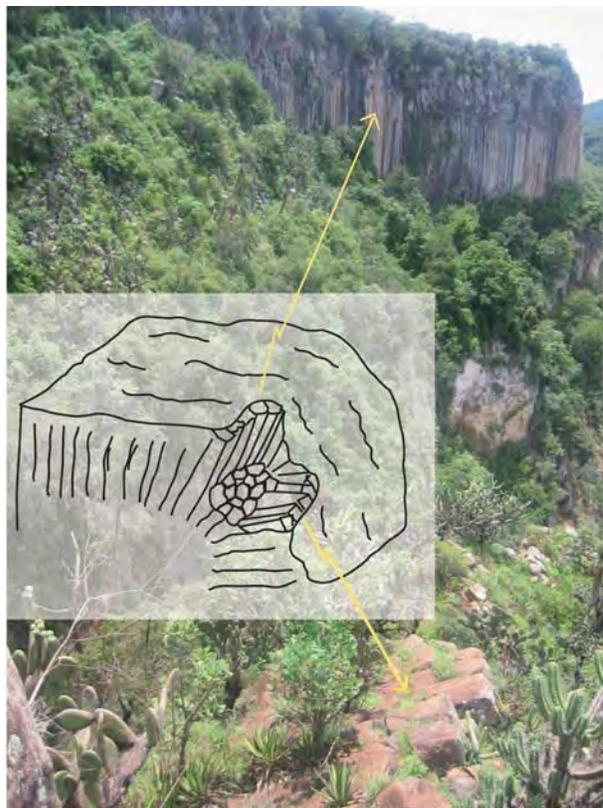
En el caso particular de Santa María Regla, el desarrollo de la prismatización es provocado por superposición de los siguientes eventos:

1. Desarrollo de una paleogeografía en la que existían corrientes fluviales de al menos 2<sup>do</sup> orden como el actual Río de Tulancingo.
2. Truncamiento de estos sistemas fluviales por vulcanismo y procesos de remoción en masa generando cuerpos de agua aislados. Hay evidencias de que en el Pleistoceno, la región donde ahora se encuentran los prismas, presentaba cuerpos lagunares aislados, asociados al truncamiento de drenajes por los depósitos volcánicos de la Sierra de Las Navajas como es el caso de un cuerpo cartografiado al norte de Alcholoya a escasos 10 km al NE de Santa María Regla (Stephen y Alyson, 1997) o por grandes deslizamientos de masas como es el caso del paleolago de Amajac cerca de Atotonilco el Grande (Arellano-Gil et al., 2005).

Al suroccidente de la población de Aguacatitla, en uno de los últimos afloramientos hacia el norte del derrame prismatizado, se aprecia que este sobreyace a un pequeño horizonte de 0.5 m de espesor de conglomerados polimícticos, que denotan que al menos en el área donde se prismatizó el basalto existía un cuerpo aluvial

que pudo haber intervenido en el enfriamiento y encapsulamiento del cuerpo lávico.

3. Desarrollo de una copiosa actividad volcánica basáltica en toda la región de Hidalgo y Veracruz hacia finales del Pleistoceno e inicio del Cuaternario (Robin, 1976). Se documentaron en el área del Municipio de Huasca y alrededores de Santa María Regla, al menos tres derrames secuenciados desarrollando una peniplanicie volcánica sobre los flujos piroclásticos de la Sierra de Las Navajas.
4. Intersección entre el frente de un potente derrame (30 m de espesor) de lava basáltica muy homogénea representante de esta actividad magmática antes referida con un río o pequeño brazo lagunar, lo cual provoca que se enfríen sus superficies superior e inferior, proceso evidente en el desarrollo de una costra solidificada de lava amorfa en la parte superior de los prismas, aislando el cuerpo lávico en el centro de estas dos superficies solidificadas (Fotografía 14).
5. El arroyo continúa su flujo sobre la superficie superior del derrame después de superar el embalse provocado por éste, con lo que induce a un enfriamiento rápido, constante y homogéneo del cuerpo lávico aislado.



FOTOGRAFÍA 15. Lóbulo frontal del derrame prismatizado, esto se aprecia en el desarrollo de los prismas en forma horizontal en la parte inferior de la fotografía y bordeando un afloramiento de flujos piroclásticos.

6. Desarrollo del proceso de VOPONUCE que provoca el crujido, que al progresar uniendo todas las fracturas de tensión individuales, desarrollan la prismatización como se explicó anteriormente.
7. La continuación del proceso fluvial de la barranca de Alcholoaya sobre el derrame terminó por erosionarlo y seccionarlo casi hasta su base, mostrando los prismas como una maravilla natural.

Para determinar las características del derrame de basalto, se analizó la posibilidad de que éste fuera a partir de un derrame fisural, ya que los afloramientos de los prismas sólo se observan sobre la barranca de Alcholoaya; sin embargo, no se observaron en la imagen de satélite, ni en campo, elementos de la existencia de una zona de debilidad que diera origen a este cuerpo lávico; por otra parte al suroccidente de la población de Aguacatitla en uno de los últimos afloramientos hacia el norte del derrame prismatizado, se ve claramente el desarrollo de los prismas en



FOTOGRAFÍA 16. Prismas en la barranca de Almoloya separados del cantil con inclinación en "cantiliver" con alto riesgo de colapsarse como se aprecia en la base.



FOTOGRAFÍA 17. Prismas en el parque recreativo con cortes transversales que provocan colapso de secciones del prisma hacia la barranca.

forma horizontal y fuertemente inclinada en forma radial rodeando un afloramiento de flujos piroclásticos subyacentes, dando la idea de ser el lóbulo frontal de un derrame encapsulado y con prismatización en su centro (Fotografía 15).

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se identifica la interacción de dos campos volcánicos con expresiones geomórficas poco diferenciables en imagen de satélite y modelo digital de elevación y constituidas por rocas de diferentes composiciones, pero edades casi contemporáneas.

El primero constituye el vulcanismo pleistocénico de riolitas hipercalinas en la Sierra de Las Navajas y el segundo que se intercala hacia la cima del primero y está constituido por campos pliocuaternarios de composición principalmente basáltica calcoalcalina que es el que desarrolló la prismatización en Santa María Regla.

Se determinó la edad del derrame en  $2.58 \pm 0.15$  Ma por el método de K-Ar en el Instituto de Geología de la UNAM.

Los análisis en muestra de mano, petrográficos y químico modal coinciden en clasificar estas rocas como basalto con variaciones a traquibasalto además se aprecian diferencias texturales entre el centro y la periferia de un prisma basáltico.

El origen y proceso de formación de los prismas basálticos en el caso particular de Santa María Regla, es provocado por la secuencia de varios eventos: el primero es la generación de un pequeño cuerpo de agua a partir de la obstrucción del drenaje por el vulcanismo de la Sierra de Las Navajas. Este cuerpo se intersecta por un potente derrame de lava basáltica muy homogénea y ocurre un rápido enfriamiento de las superficies superior e inferior del derrame aislando el cuerpo lávico, el cual continúa su rápido enfriamiento al mantenerse el flujo de agua sobre la superficie

superior del derrame, lo cual desarrolla el proceso de contracción volumétrica a partir de puntos de mayor temperatura; al progresar desarrollan fracturas de tensión entre dos de estos puntos, al irse uniendo todas las fracturas de tensión individuales, desarrollan la prismatización.

El proceso actual es la erosión fluvial de la barranca de Alcholya sobre el derrame que termina por seccionarlo como actualmente se aprecia. Al realizar un reconocimiento por la barranca de Alcholya dentro del parque recreativo, donde el turismo aprecia de primera mano los prismas basálticos, se hace evidente que varias de estas estructuras se encuentran en un punto de alta inestabilidad, ya sea por su inclinación natural o por que las columnas se encuentran seccionadas. El intemperismo, erosión y vibración provocados por las cascadas que se inducen a caer sobre los prismas, pueden provocar un colapso altamente peligroso para el turismo que transita hacia su base.

Se recomienda realizar un estudio de estabilidad de bloques y acatar las recomendaciones que se propongan para reducir el peligro evidente en este parque recreativo (Fotografías 16-18).



FOTOGRAFÍA 18. Prisas en el parque recreativo separados del cantil por seccionamiento transversal y con alto nivel de inestabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Arellano-Gil, J., Velasco-De León, P., Silva-Pineda, A., Salvador-Flores, R., Beltrán-Romero, F., 2005.** Origen y características geológicas del paleo-Lago de Amajac, Hidalgo: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22(2), 199-211.

**Ferrari, 2000.** Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana A. C. Tomo LIII, No. 1 (2000) 84-92.

**Ferrari, 2004.** Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. Instituto de Geología UNAM, Geology, 32, 1, 77.

**Geyne, A.R., Fries, C., Segerstrom, K., Blanck, R.F., Wilson, I.F., 1963.** Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, Hidalgo México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables.

**Goehring, L., Morris, S., 2004.** The scaling of columnar joints in basalt: *Journal of Geophysical Research*, XXXX, DOI:10.1029/.

**Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., Agterberg, F.P., Bleeker, W., Cooper, R.A., Davydov, V., Gibbard, P., Hinnov, L.A., House, M.R., Lourens, L., Luterbacher, H-P., McArthur, J., Melchin, M.J., Robb, L.J., Shergold, J., Villeneuve, M., Wardlaw, D.R., Ali, J., Brinkhuis, H., Hilgen, F.J., Hooker, J., Howarth, R.J., Knoll, A.H., Laskar, J., Monechi, B., Shackleton, N.J., Shields, J.A., Strauss, H., Van Dam, J., Veizer, J., van Kolfshoten, Th., Wilson, D., 2006.** *A Geologic Time Scale 2004*: Cambridge University Press, 589 p.

**Grossenbacher, K.A., McDuffie, S.M., 1995.** Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69(1), 15, 95-103.

**Humboldt, A., Bonpland, A., 1991.** Viaje a las regiones equinocciales del nuevo continente, (2ª ed.). Monte Ávila Editores. Caracas – Venezuela. 5 volúmenes.

**INEGI, 1983.** Carta geológica Pachuca F14-11, esc. 1:250,000.

**Jeong-Seon, K., Sung-Hyo, Y., Hyun-Chu, H., 2005.** Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea: *Journal Petrol. Soc. Korea*, 14(4), 212-225.

**López-Reyes, Julián, De los Santos, J.J., Cacho-Casillas, S., Sánchez, B., 1997.** Carta Geológico Minera Pachuca F14-11, Consejo de Recursos Minerales.

**Mallet, R., 1874.** On the origin and Mechanism of production of the Prismatic (or columnar) structure of Basalt: *Proceedings of the Royal Society of London*, 23, 180-184.

**Moore, G., Marone, C., Carmichael, L.S., Renne, P., 1994.** Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, 106, 383-394.

**Muller, G., 1998.** Experimental simulation of basalt columns: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 86, 93–96.

**Raisz E., 1964.** Landforms of Mexico. Cambridge Mass., Mapa 1:3000,000.

**Robin, C., 1976.** El vulcanismo de las planicies de la Huasteca, datos geoquímicos y petrográficos: *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, 96, 55-92.

**Sánchez-Rojas, L.E., De La Calleja, M.A., 2003.** Carta geológico minera Pahuatlán F14-D73, esc. 1:50,000; Consejo de Recursos Minerales. 1 carta y texto.

**Sánchez-Rojas, L.E., Arredondo-M.A., Cardozo V.A., 2005.** Carta geológico minera Pachuca F14-D81, esc. 1:50,000; Servicio Geológico Mexicano. 1 carta y texto.

**Schaefer, C.J., Kattenhorn, S.A., 2004.** Characterization and evolution of fractures in low-volume pahoehoe lava flows, eastern Snake River Plain, Idaho: *Geological Society of America Bulletin*, 89 (9), 1295-1308.

**Stephen N. y Alyson, L. 1997.** Field excursion to the Sierra Las Navajas, Mexico a Pleistocene peralkaline rhyolite with debris avalanche deposit Libro guía de las excursiones geológicas de la II Convención sobre la evolución geológica de México.

**Toramaru, A., Matsumoto, T., 2004.** Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment: *Journal of Geophysical Research*, 109, B02205, doi: 10.1029/2003JB002686, 2004.

**Vidal, S.R., Paz, M.F., Demant, A., López, M.M., 2007.** Ignimbritas hipercalinas del Mioceno em Sonora Central: reevaluación de la estratigrafía y significado del vulcanismo terciario. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 1, 47-67.

**Weinberger, R., 2001.** Evolution of polygonal patterns in stratified mud during desiccation: The role of flaw distribution and layer boundaries: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 20-31.

Artículo de divulgación

# Geología y distribución de la Amazonita en los Granitoides

## Aspectos mineralógicos, cristaloquímicos y tipomórficos

Mikhail Ostrooumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,  
Instituto de Investigaciones Metalúrgicas,  
Departamento de Geología y Mineralogía  
ostroum@zeus.umich.mx

### RESUMEN

En el presente artículo se examinan las características que inciden en la distribución geológica de la amazonita, la relación existente entre sus manifestaciones y yacimientos con los tipos genéticos específicos de las formaciones granitoides. Se describen las condiciones geológicas, mineralógicas y geoquímicas de formación, diversas propiedades, los atributos tipomórficos, la naturaleza del color y génesis de la amazonita. Se da una breve sinopsis de la historia y perspectivas de utilización de este mineral. Esta investigación está dirigida a especialistas en las áreas de mineralogía, geoquímica, gemología y a geólogos dedicados a la prospección y evaluación de yacimientos minerales, pero también a un amplio círculo de lectores interesados en el tema.

**Palabras clave:** Amazonita, distribución geológica, tipos genéticos específicos, atributos tipomórficos, cristaloquímica.

Este trabajo, cedido exclusivamente para nuestra revista, aborda algunos de los aspectos más relevantes del libro “Amazonita: Mineralogía, Cristaloquímica, Tipomorfismo” del autor del presente artículo Mikhail Ostrooumov, que acaba de ser publicado (noviembre de 2007) por la Editorial Politécnica, en San Petersburgo, Rusia.

## ABSTRACT

*This work characterizes the distinctive features that influence in the geological setting of amazonite as well as in the relationship between their deposits and specific genetic types of the granitoid formations. The principal chapters deal with the geological, mineralogical and geochemical conditions of formation, various properties, typomorphic features, color nature, and genesis of this mineralogical variety of the potassium feldspars species. One chapter provides a brief synopsis to the history and to a few of the recent perspectives of amazonite employment. This article makes one's way to mineralogists, geochemists, gemologists, and geologists which are working in the prospect and evaluation of mineral deposits; and also to the public at large (for example, to collectors of minerals and gemstones) that have the interest in this subject.*

**Key Words:** *Amazonite, geological setting, especific genetic types, typomorphic features, crystal chemistry.*

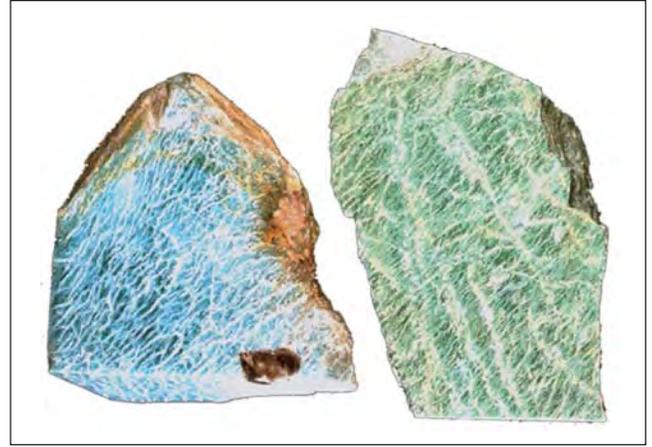
## INTRODUCCIÓN

La amazonita (amazonstone) pertenece a los minerales que han llamado la atención de los mineralogistas desde hace muchas generaciones. Entre los científicos que investigaron la amazonita se encuentran los famosos corifeos de la geología y mineralogía: A. des Cloiseaux, N. Kokcharov, V. Vernadsky, V. Goldschmidt, A. Fersman y muchos otros. La historia del descubrimiento de la amazonita y de las investigaciones científicas sobre esta variedad de feldespato, está llena de enigmas, paradojas, errores e hipótesis.

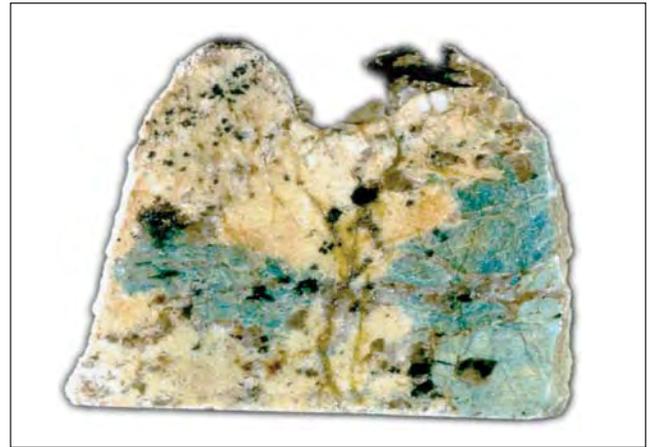
Durante los últimos años se han dedicado muchas investigaciones y publicaciones que abordan diversos aspectos de la cristalografía, propiedades, y génesis de la amazonita. Al mismo tiempo se podría decir que, hasta la fecha, no ha sido publicada ninguna investigación especial en la que se hayan descrito todos sus datos geológicos, mineralógicos y cristalográficos, desde la perspectiva moderna de la ciencia contemporánea. Por este motivo, en San Petersburgo, Rusia, acaba de ser publicado, bajo mi autoría, un libro que es una especie de tratado mineralógico totalmente dedicado a este conocido mineral, con el título "Amazonita: mineralogía, cristalografía, tipomorfismo" y del que el presente artículo quiere resaltar algunos de sus principales aspectos.

Cabe destacar que en el libro mencionado se abordan los problemas actuales y los resultados finales de los estudios modernos de la amazonita, en sus aspectos más sofisticados. Se propone una amplia metodología en la descripción sistemática de todas las áreas de estudio de la amazonita, que corresponde completamente a las expectativas actuales de la Mineralogía Avanzada. En particular, en este trabajo se consideran las leyes de la distribución espacial y temporal de la amazonita en diferentes formaciones geológicas, así como también la relación de sus yacimientos con diversos tipos genéticos de las formaciones graníticas. Se describen las condiciones de existencia de este mineral en diferentes ambientes geológicos, características mineralógico-geoquímicas y otras particularidades específicas de las formaciones naturales concretas de amazonita. Se discuten las propiedades cristalográficas, índices característicos, naturaleza del color, génesis y tipomorfismo de la amazonita. Finalmente, se propone un ensayo histórico breve y perspectivas prácticas del uso de este mineral.

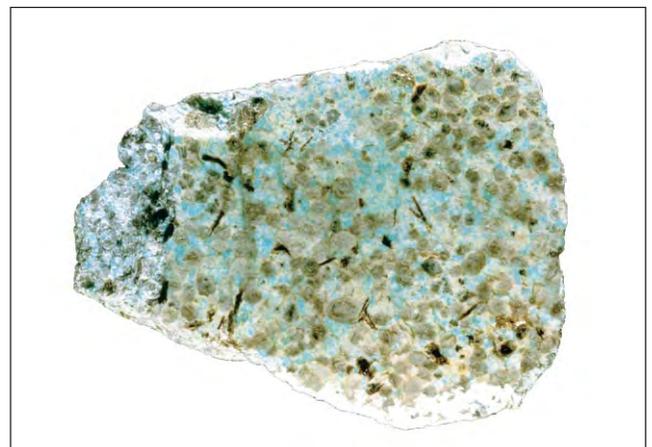
Se sabe que muchos mineralogistas y coleccionistas destacan la gran variedad de color y de matices verde-azules (Figura 1) que presenta este mineral (Ostrooumov, 1982a). La naturaleza del color de la amazonita



A



B



C

FIGURA 1. Paleta de colores en amazonitas:  
A: pegmatitas precámbricas  
B: pegmatitas paleozoicas  
C: granitos mesozoicos

ha sido objeto de investigación de mineralogistas y geólogos desde hace casi doscientos años. Sin embargo, los intentos de explicación de este fenómeno específico en el grupo de los feldespatos no han permitido, hasta el presente, llegar a un resultado definitivo. La hipótesis sobre la relación entre el color de la amazonita y la impureza isomorfa de plomo, hasta hoy día es la más reconocida en el medio mineralógico (Marfunin y Bershov, 1970; Hofmeister y Rossman, 1985). Por otra parte, se han propuesto también otras hipótesis con una argumentación diferente, en las que el color se relaciona con las impurezas de hierro, grupos de agua, grado de orden/desorden Al/Si en la estructura cristalina, etc. (Ostrooumov *et al.*, 1989).

Ostrooumov, (2007) señala que estos diversos puntos de vista sobre el origen del color de la amazonita, reflejan sólo diferentes aspectos del mismo fenómeno, que no se excluyen el uno al otro sino que se complementan mutuamente. De todos modos, está claro que el color de la amazonita se caracteriza por una naturaleza compleja determinada por un conjunto de causas, que reflejan una amplia variación de particularidades químicas y estructurales de este mineral.

Durante las últimas décadas, los geólogos y mineralogistas han discutido también el uso de la amazonita en la búsqueda y prospección de yacimientos minerales que contienen metales económicos y tierras raras. Existen diferentes opiniones al respecto. Desde nuestro punto de vista, la respuesta más acertada se encontraría en la caracterización detallada de la posición geológica y petrológica de la amazonita, así como también en la investigación de su composición química, estructura y propiedades correspondientes en cada tipo genético de las formaciones graníticas concretas.

En el libro recientemente publicado (Ostrooumov, 2007) se consideran diversos datos nuevos sobre la geología, mineralogía, cristalografía y tipomorfismo de la amazonita. Veamos aquí sólo algunos de los resultados más

importantes, que muestran la importancia de este mineral en la mineralogía contemporánea.

## GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA DE LA AMAZONITA

Los yacimientos de amazonita se originan en varios tipos genéticos de formaciones graníticas (granitos y pegmatitas de diferentes tipos, aplitas, vetas hidrotermales, formaciones subvolcánicas), que se caracterizan por diferente posición geológica. No obstante, los yacimientos principales de este mineral están relacionados con los macizos graníticos y vetas pegmatíticas, donde la amazonita juega un papel destacado como componente mineral importante (Figura 2).

La edad geológica de estas formaciones con amazonita varía del Precámbrico (1800-2000 millones de años) al Mesozoico (150-180 millones de años). Recientemente, en los Alpes Orientales y en el Pamir Central se han descubierto pegmatitas con amazonita de edad eocénica (alrededor de 40 millones de años). Desde el punto de vista genético y espacial, las pegmatitas que están ligadas a grandes macizos de granitos alcalinos son las formaciones más antiguas (precámbricas) y profundas, mientras que los granitos de tipo F-Li, donde la amazonita es el mineral esencial, son más jóvenes (mesozoicos) y menos profundos. Analizando la ocurrencia de la amazonita en el tiempo geológico, se ha establecido su considerable incremento hacia las épocas más jóvenes por su edad geológica, tanto por el mayor grado de desarrollo como por la escala de sus manifestaciones (macizos graníticos). Por otro lado, las amazonitas de las formaciones más antiguas se distinguen por su color más intenso y por una paleta de matices más rica. Estas amazonitas se encuentran sólo en las pegmatitas precámbricas de Canadá y Rusia.

Es muy curioso que hasta hace medio siglo la amazonita era considerada como una variedad mineralógica muy rara. Actualmente, el número de yacimientos grandes de amazonita es de más de una centena, sin considerar los depósitos menos importantes. De acuerdo con datos recientes (Ostrooumov, 1989), este mineral se ha encontrado en todos los continentes (menos en la Antártida) y en muchos países.

La mayoría de los yacimientos de amazonita (Figura 2) se encuentra en los límites de las plataformas precámbricas, como la Siberiana, la Norteamericana, la Australiana y los escudos Ucraniano, el Índico, el del Báltico y el de Groenlandia. También en los macizos graníticos relacionados, principalmente, al cinturón orogénico kimmeriano como sucede en la región del Baikal (Rusia) y en Mongolia, y en menor grado al caledoniano y hersiniano.

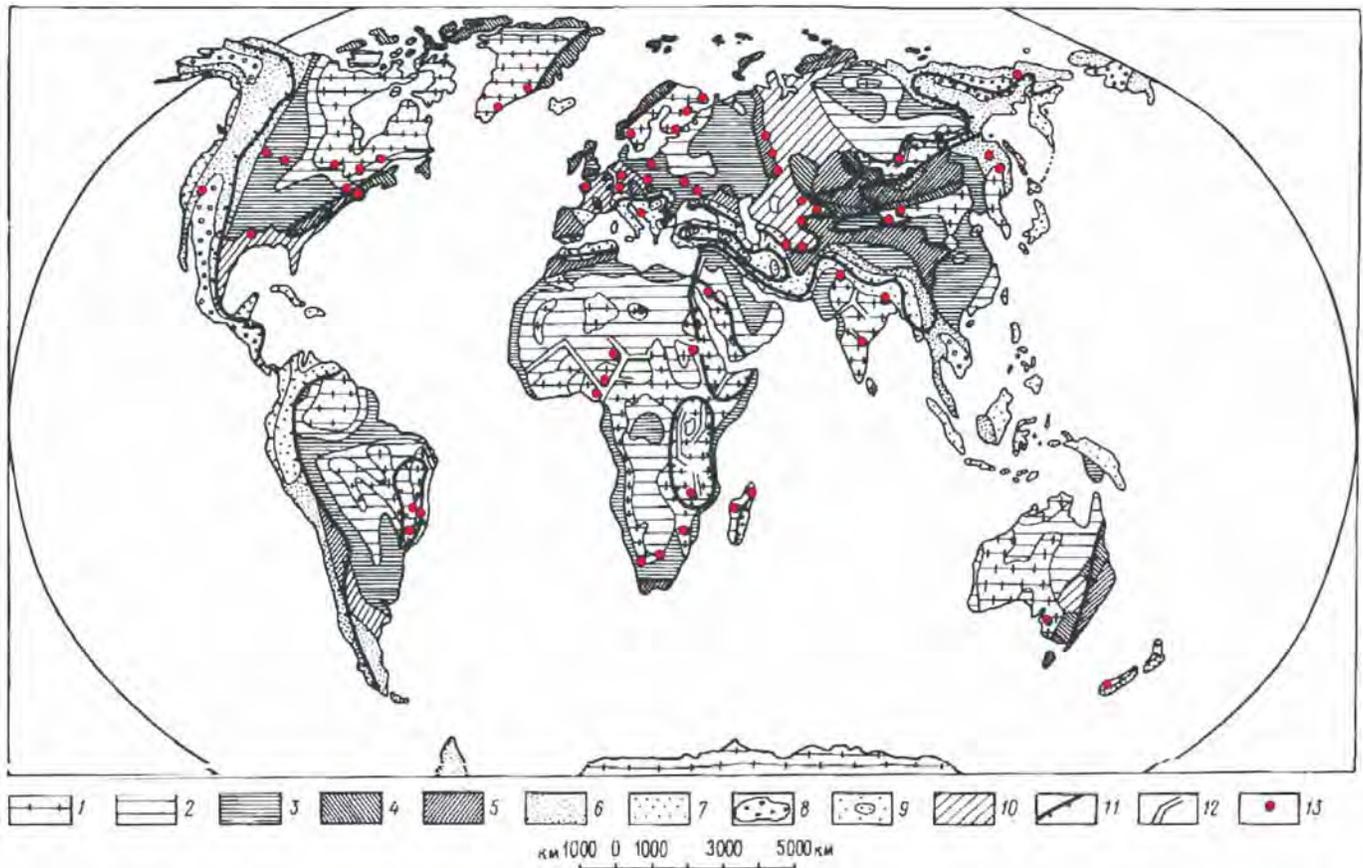


FIGURA 2. Distribución de los yacimientos principales de amazonita (esquema tectónico según Belousov): 1 - escudos, 2 - pendientes de escudos y anticlinorios de plataformas antiguas, 3 - sinclinorios de plataformas antiguas, 4 - 7 - regiones de plegamiento: 4 - caledónicos, 5 - hercínicos, 6 - cretácicos (kimmerian), 7 - alpinicos, 8-9-macizos medianos de cimentación en regiones de plegamiento, 10- plataformas epipaleozoicas con cubierta sedimentaria, 11 - fronteras de cinturones neotectónicos y rifts, 12 - grabens, 13 - yacimientos de amazonita

alcalinos se asocian depósitos metamórficos con niobio, tierras raras, zircón, flúor, berilio y torio (a veces con plomo).

Las manifestaciones de amazonita están vinculadas con estos tres tipos definidos de formaciones de granitoides: los leucogranitos de alaskita, los leucogranitos subalcalinos y los granitos alcalinos. La amazonita se encuentra en granitos, aplitas, pegmatitas, en filones cuarzofeldespáticos, y también en algunas rocas subvolcánicas.

La edad de las rocas en las que se encuentra la amazonita varía en un gran diapasón, desde el Proterozoico al Terciario. A las formaciones más antiguas (Proterozoico) se vinculan las pegmatitas amazoníticas de los granitos alcalinos como en la Península de Kola y en Siberia Oriental, en donde la amazonitización a veces alcanza un máximo tanto en intensidad, como en la homogeneidad de coloración; a las formaciones más jóvenes (Jurásico-Cretácico),

En el curso del ciclo tectónico-magmático de inversión se conformaron diversas formaciones de granitoides: la granodiorítica, la granítica, la leucogranítico-alaskítica, la subalcalina leucogranítica (o de granitos ricos en flúor y litio) y la alcalino granítica, que se diferencian visiblemente por sus características geoquímicas (Tabla 1). Con los macizos de las formaciones granodioríticas y graníticas no están relacionados los yacimientos de metales raros. Los macizos leucogranítico-aplíticos producen diversos tipos de yacimientos: los pegmatíticos de berilio (sin litio) y niobio-tantalio; los greisen de cuarzo y estaño, wolframio, molibdeno, bismuto y berilio. Los intrusivos de granito subalcalino relacionados a pequeñas zonas de debilidad en lineamientos angostos, generan en cúpulas y apófisis depósitos filonianos (tipo greisen) de metales raros como estaño, talio, litio, berilio, flúor, y más raramente rubidio, cesio y wolframio. Por su parte, a las cúpulas y apófisis de granitos

| Elemento | Tipo          |                     |                       |         |                           |                         |                   | Valor medio en los granitoides (según Vinogradov) |
|----------|---------------|---------------------|-----------------------|---------|---------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|
|          | Gabro-Diorita | Diorita-Plagiograno | Diorita-Grano diorita | Granito | Leuco granito de Alaskita | Leuco granito subcalino | Granito o alcalin |                                                   |
| Cr       | 190           | 60                  | 40                    | 20      | 9                         | 4                       | 5                 | 25                                                |
| V        | 220           | 95                  | 70                    | 30      | 15                        | 5                       | 3                 | 40                                                |
| Co       | 40            | 15                  | 10                    | 7       | 2,5                       | 2                       | 1                 | 5                                                 |
| Ni       | 80            | 50                  | 15                    | 10      | 4                         | 2                       | 1                 | 8                                                 |
| Cu       | 44            | 32                  | 25                    | 18      | 12                        | 10                      | 5                 | 20                                                |
| F        | 200           | 300                 | 600                   | 700     | 1400                      | 3800                    | 1600              | 800                                               |
| B        | 10            | 13                  | 12                    | 18      | 35                        | 12                      | 7                 | 15                                                |
| Rb       | 45            | 75                  | 110                   | 190     | 290                       | 600                     | 260               | 200                                               |
| Li       | 12            | 18                  | 25                    | 40      | 75                        | 220                     | 90                | 40                                                |
| Cs       | 0,1           | 0,4                 | 1,3                   | 3,2     | 8                         | 25                      | 9                 | 5                                                 |
| Tl       | -             | 0,1                 | 0,5                   | 0,8     | 1,3                       | 3                       | 1,3               | 1,5                                               |
| Be       | 0,7           | 1,5                 | 2                     | 3       | 6                         | 9                       | 5                 | 5,5                                               |
| Sr       | 400           | 600                 | 400                   | 300     | 100                       | 20                      | 30                | 300                                               |
| Ba       | 350           | 550                 | 850                   | 700     | 250                       | 50                      | 75                | 830                                               |
| Sn       | 2,1           | 3                   | 3,9                   | 6       | 9                         | 20                      | 7,6               | 3                                                 |
| W        | 0,1           | 0,4                 | 0,8                   | 1,9     | 3                         | 4,3                     | 1,2               | 1,5                                               |
| Mo       | 0,5           | 0,8                 | 1                     | 1,5     | 1,5                       | 1,4                     | 0,8               | 1                                                 |
| Zn       | 90            | 110                 | 75                    | 50      | 33                        | 30                      | 80                | 60                                                |
| Pb       | 12            | 21                  | 26                    | 30      | 36                        | 40                      | 40                | 20                                                |
| Zr       | 55            | 70                  | 130                   | 170     | 200                       | 150                     | 800               | 200                                               |
| Hf       | 0,2           | 0,6                 | 1                     | 1,5     | 5                         | 7                       | 21                | 1                                                 |
| Nb       | 3             | 4                   | 7                     | 17      | 23                        | 80                      | 120               | 20                                                |
| Ta       | 0,3           | 0,6                 | 0,8                   | 1,5     | 3,6                       | 10                      | 6                 | 3,5                                               |
| TR+Y     | 40            | 60                  | 120                   | 180     | 260                       | 350                     | 500               | 185                                               |
| U        | 0,8           | 1,5                 | 2                     | 4,6     | 8                         | 9                       | 10                | 3,5                                               |
| Th       | 4             | 5,3                 | 7,5                   | 25      | 38                        | 40                      | 42                | 18                                                |

Tabla 1. Contenido medio (g/t) de elementos traza en las rocas de las formaciones de granitoides.

Nota. Tabla configurada con contenidos medios de los elementos en los distintos granitoides, según Beskin (1979).

se asocian algunos granitos subcalinos, como sucede en la región del Transbaikalie, Rusia y en Mongolia, donde la amazonización abarca macizos completos, pero la intensidad de color de este mineral es mucho más débil que en los cuerpos amazonizados de las pegmatitas de los granitos subcalinos de la Península de Kola, antes mencionados.

### Granitos de Amazonita y sus derivados

Los granitos de amazonita, que en la literatura geológica se acostumbraba mencionar como un tipo exótico de granitoides, en la actualidad se estudian como formaciones geológicas importantes y ampliamente distribuidas. En opinión de Feldman *et al.* (1967), y otros autores, el valor primordial de los granitos de amazonita estriba en que, en una gran cantidad de casos, son la fuente económica de metales como el tantalio, niobio y estaño y una fuente con perspectivas para la obtención de litio, rubidio, cesio y otros elementos.

Los depósitos de metales raros de este tipo son en la actualidad ampliamente conocidos en Rusia, Argelia, Egipto, China, Mongolia y Estados Unidos. Según datos de Kovalenko *et al.* (1971), semejantes

macizos graníticos se agrupan en zonas alargadas que pueden alcanzar de 3 km a varias decenas de kilómetros de longitud y de 0.5 a 10 km de ancho. Estas zonas, por lo general, coinciden con cinturones de diques y pequeñas intrusiones de diversa composición y edad, asociados a fallas regionales. Los granitos subcalinos conforman diques y troncos y cuerpos de forma irregular, cuyas zonas de influencia van desde unas decenas de metros hasta algunos kilómetros de longitud y desde cinco metros hasta varias centenas de metros de ancho. En profundidad pueden alcanzar varios cientos de metros.

Las rocas encajonantes de los leucogranitos subcalinos son rocas vulcanosedimentarias, pero también formaciones granitoides más antiguas. Alrededor de las intrusiones de granito de amazonita se observan intensas alteraciones metasomáticas, dentro de las rocas encajonantes. De esta forma, en los granitoides más antiguos surgen zonas de biotización, de metacrístales de cuarzo, albitización, amazonización, que con frecuencia crean la ilusión de gradaciones paulatinas entre los granitoides de distintas formaciones. El tamaño de los macizos constituidos por completo de granito de amazonita es, por lo general, pequeño (de 1 a 1.5 km<sup>2</sup>) y su edad se ha estimado que varía desde el Paleozoico medio al Mesozoico tardío.

Los granitos que contienen amazonita por lo general presentan la siguiente zonación, desde el centro del cuerpo hacia su periferia: biotita-muscovita, microclina-albita, amazonita-albita, micas de litio. A veces es muy difícil diferenciar las zonas de microclina-albita y amazonita-albita, por lo que es más práctico tener en cuenta los cambios paulatinos desde las zonas de biotita-muscovita a las de amazonita (microclina)-albita.

### Pegmatitas de Amazonita

Las pegmatitas de amazonita más interesantes e importantes en el sentido práctico, son las que están relacionadas a los granitos alcalinos. Para ellas es característico un amplio e intenso

desarrollo no sólo de amazonización, sino también de otros procesos posmagmáticos (albitización, mineralización, etc.). Según datos de Voloshin y Pakhomovsky (1986), los cuerpos pegmatíticos con amazonita se localizan primordialmente en los contactos de los macizos alcalinos, coincidentes con las soluciones alcalinas parcialmente modificadas o con esquistos, gneis y otras rocas metamórficas.

Las pegmatitas de amazonita más antiguas (del Precámbrico), que contienen paragénesis de minerales de tierras raras, son conocidas en la actualidad en muchos lugares del mundo: en la Península de Kola en Rusia, en Siberia oriental, en Estados Unidos, Nigeria, Mozambique y otros países. Estos cuerpos pegmatíticos se presentan, por lo general, en forma de vetas y lentes, cuya longitud varía de unos cuantos metros hasta algunas centenas de metros, sin sobrepasar los 400-600 m y un espesor entre 1 y 20 m. La zonación en estos cuerpos está débilmente representada y se manifiesta sólo por el aumento de tamaño de los minerales constitutivos de la roca a partir de la salbanda y hacia el centro de los filones y en el cambio, en esta misma dirección, del tono de color del feldespato potásico, desde el gris y rosa hasta alcanzar distintas tonalidades de azul y verde. Además de la microclina y la amazonita, otros minerales importantes de las pegmatitas son la albita y el cuarzo. Minerales como biotita, fluorita, magnetita y granate se presentan en menor cantidad. Los minerales accesorios son gadolinita, tantalita-columbita, fergusonita, galena, y más raramente itrialita, torita, pirocloro, samarskita y berilo.

Las pegmatitas de amazonita del Paleozoico temprano y medio son semejantes en dimensión y forma a las ya descritas para el Precámbrico, pero se diferencian de estas últimas por una mayor presencia de gadolinita y berilio, como sucede en depósitos de la región de Yacutia, en Rusia, y al sur de Noruega y en Polonia.

Las pegmatitas de amazonita del Paleozoico tardío asociadas a granitos alcalinos, se conocen en los Urales, en Madagascar y en Estados Unidos. Se presentan como mantos y lentes de pequeña longitud (por lo general de algunas decenas de metros) y espesores hasta de 10 m. Estos filones pegmatíticos se encuentran diferenciados, una buena parte con estructuras gráficas y pegmatíticas que presentan, a veces, grandes bandas con cristales de feldespato, cuarzo, topacio y algunos otros minerales. Los minerales constitutivos de estas pegmatitas están representados por microclina, amazonita, albita y cuarzo, con menor presencia de micas. Los minerales accesorios son granate, topacio, berilio, fenaquita, columbita, fergusonita, samarskita y torita.

## PRIMER DESCUBRIMIENTO DE AMAZONITA EN MÉXICO

Por lo que se refiere a México, existe el reporte de por lo menos dos localidades con este mineral, una en el estado de Oaxaca y otra en el estado de Chihuahua (Schmitter y Martín Del Campo, 1980), aunque hasta ahora en sólo una de ellas ha sido identificado recientemente un depósito, por Sánchez y Robles (2002). El citado yacimiento se localiza en la parte norte de la República Mexicana, en el sitio conocido como Cerros Bahues, municipio Coronado, Chihuahua. El afloramiento que contiene a este mineral es un cuerpo de composición granítica del Eoceno (38 Ma/K-Ar), que incluye a pegmatitas del Oligoceno (32 Ma/K-Ar), enriquecidas en amazonita.

El análisis mineralógico, cristaloquímico y colorimétrico de las muestras tomadas en este yacimiento (Figura 3) ha mostrado que sus particularidades específicas de composición química, estructura y color son muy parecidas a las amazonitas que se formaron en granitos de F-Li en Siberia, Transbaikal, Rusia. De acuerdo con nuestros datos, en las



FIGURA 3. Amazonita mexicana en granitos de F - Li (Municipio Coronado, estado de Chihuahua)

muestras estudiadas hemos encontrado presencia de diferentes minerales de tantalio y niobio (principalmente de las series Columbita-Tantalita y Pirocloro-Microlita), que antes no habían sido encontrados en los yacimientos de México (artículo en preparación).

Estos hechos muestran, ante todo, el alto potencial del subsuelo mexicano con relación a la búsqueda de nuevas materias primas, así como también la clara posibilidad de encontrar nuevos tipos de yacimientos minerales que podrían ser detectados en un futuro en el territorio del país.

## CRISTALOQUÍMICA Y COLOR DE LA AMAZONITA

En mineralogía existe una regla: las propiedades de los minerales están relacionadas con la composición química y la estructura cristalina. A su vez, la composición química y la estructura cristalina están ligadas mutuamente y determinan la naturaleza de una especie o variedad mineral.

El análisis de los datos bibliográficos y los resultados de nuestras propias investigaciones de la composición química de las amazonitas provenientes de diferentes tipos genéticos de rocas graníticas (Ostrooumov *et al.*, 1989) permiten, ante todo, comprender la diferencia entre las amazonitas y los feldespatos potásicos de colores ordinarios (no amazonitas). Las particularidades geoquímicas más generales (es decir independientes de las condiciones geológicas de localización) y más esenciales de la amazonita, en comparación con los feldespatos

potásicos asociados, son las concentraciones siempre más elevadas de plomo y de elementos trazas radioactivos – rubidio, uranio, torio.

Además, de acuerdo con los datos obtenidos, existe la misma tendencia en la evolución de la composición química de las amazonitas en las pegmatitas y granitos de diferente edad y profundidad de formación. A medida que se observa la transición de la paragénesis de los feldespatos potásicos comunes hacia los mismos con las amazonitas se ha establecido que se enriquecen en potasio (Ortoclasa), plomo y componentes alcalinos raros y volátiles, y se empobrecen en hierro, bario, estroncio y en componente sódico (Albita).

Al mismo tiempo, podemos mencionar que las amazonitas que se forman en diferentes condiciones petrológicas y geoquímicas se diferencian por algunas particularidades específicas de su composición química. Así, por ejemplo, la composición química de las amazonitas de las pegmatitas precámbricas (Península de Kola, Rusia) cambia en un amplio diapasón, tanto para los principales componentes, como para las impurezas (Tablas 2 y 3).

A diferencia de las amazonitas precámbricas, los individuos minerales de este mineral en las pegmatitas paleozoicas (Urales) o en los granitos mesozoicos (Transbaikalie) se caracterizan por otras particularidades tipoquímicas (Tabla 3). En este caso se trata de diferentes niveles de concentración de los elementos impureza característicos. Así, las amazonitas paleozoicas contienen concentraciones máximas de rubidio, mientras que en las mesozoicas se determinan cantidades mínimas de plomo.

Esta técnica analítica ha permitido establecer que todas las muestras analizadas de amazonita

|                                | Zonas de Pegmatita con Amazonita                               |                                                                               |                                                                       |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                                | Periférica con textura pegmatítica I generación (azul)<br>Wt % | Intermedia con textura de Bloques Pequeños II generación (azul verde)<br>Wt % | Central con textura de Bloques Grandes III generación (verde)<br>Wt % |
| SiO <sub>2</sub>               | 66.20                                                          | 65.53                                                                         | 64.44                                                                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.9                                                           | 18.8                                                                          | 18.6                                                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.07                                                           | 0.06                                                                          | 0.04                                                                  |
| K <sub>2</sub> O               | 10.8                                                           | 13.5                                                                          | 14.6                                                                  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.80                                                           | 2.56                                                                          | 1.53                                                                  |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0.23                                                           | 0.34                                                                          | 0.69                                                                  |
| Cs <sub>2</sub> O              | 0.022                                                          | 0.036                                                                         | 0.058                                                                 |
| H <sub>2</sub> O               | 0.009                                                          | 0.012                                                                         | 0.034                                                                 |
| PbO                            | 0.09                                                           | 0.12                                                                          | 0.79                                                                  |
| U <sup>1</sup>                 | 4                                                              | 12                                                                            | 23                                                                    |
| Th                             | 8                                                              | 32                                                                            | 67                                                                    |
| Tl                             | 12                                                             | 75                                                                            | 150                                                                   |
| Ga                             | 30                                                             | 94                                                                            | 145                                                                   |
| Ba                             | 200                                                            | 115                                                                           | 17                                                                    |
| Sr                             | 30                                                             | 124                                                                           | 210                                                                   |

1 - ppm.

Tabla 2. Análisis químico de diferentes generaciones de amazonita en pegmatitas precámbricas (en wt % y ppm determinados por XRF).

de los yacimientos pegmatíticos pertenecen a la microclina máxima: los valores obtenidos del grado de triclinidad se encuentran en los límites 0,85-1,00 y los valores de orden monoclinico se han determinado en el intervalo 0,82-1,00. Los resultados obtenidos sugieren un alto grado de orden catiónico Si/Al en las amazonitas de las pegmatitas precámbricas y paleozoicas. Al mismo tiempo, se determinó un cierto desorden estructural en las amazonitas que se forman en los granitos mesozoicos – como resultado de la difracción de rayos X algunas variedades de amazonita muestran valores de triclinidad entre 0,2-0,5. Con base en estos datos, se puede constatar la correlación entre la intensidad del color de la amazonita y el grado de desorden estructural: las variedades de color claro se caracterizan por valores menores de triclinidad, mientras que las de color intenso muestran valores máximos en este parámetro.

Como resultado de estas investigaciones cristaloquímicas y espectrométricas se han establecido las características específicas (composición química, estructura cristalina, color, etc.) de las amazonitas que se formaron en diferentes condiciones de mineralogénesis (Ostrooumov *et al.*, 1989). Así, por ejemplo, las particularidades espectrométricas más típicas de las amazonitas precámbricas que se formaron en las pegmatitas de la Península de Kola son los espectros UV-Visibles y de Resonancia Paramagnética Electrónica específicos que están relacionados con la presencia de impurezas isomorfas de plomo, los cuales se transforman en centros paramagnéticos electrónicos o huecos. Estos centros no se encuentran en los feldespatos de otra naturaleza química o estructural.

## TIPOMORFISMO

A finales de los años setentas y al principio de los ochentas del siglo XX, como resultado de una intensa discusión científica, se propuso entre los minerales tipomorfos considerar las especies minerales que ocupan un lugar determinado dentro de un proceso geológico-

| Composición química en ppm | 1         | 2          | 3          |
|----------------------------|-----------|------------|------------|
| Pb                         | 3410      | 460        | 160        |
|                            | 300-11000 | 50-1100    | 60-250     |
| Rb                         | 3400      | 7730       | 5100       |
|                            | 1100-6300 | 1200-22000 | 1410-10000 |
| Th                         | 27        | 13         | 3          |
|                            | 8-61      | 3-21       | 2-4        |

Tabla 3. Características tipoquímicas de las amazonitas en pegmatitas (1 - Precámbricas, Península de Kola; 2- Paleozoicas, Urales) y en granitos (3-Mezozoicas, Zabaikalie).

NOTA. Numerador – valor promedio, denominador – cambio de valores de las generaciones tempranas hacia las tardías.

geoquímico dado. En otras palabras, tales minerales prácticamente representarían la misma idea que, en la geología histórica, corresponde a la definición de fósiles índice. Así, por ejemplo, los investigadores de la escuela mineralógica rusa, como resultado de estudios detallados, mostraron que para las pegmatitas graníticas se puede distinguir alrededor de 60 minerales tipomorfos, entre los cuales varias especies se forman en una o más geofases determinadas.

En el presente trabajo se considera a la amazonita como un típico mineral con índices genéticos característicos, que indican precisamente su pertenencia a un proceso geológico bien definido, a una u otra etapa del proceso o a una asociación paragenética bajo una temperatura determinada de formación. A dichos índices se ha propuesto llamarlos tipomorfos y a los minerales característicos para un determinado proceso geológico de formación se les ha definido, de igual manera, como minerales tipomorfos.

Por eso, en la descripción sistemática de la amazonita los índices tipomorfos juegan un papel importante, ya que expresan un cambio en la composición química (Tabla 2), en el contenido de las impurezas isomorfas, en las particularidades de la estructura cristalina, en el hábito y aspecto morfológico o modificación polimorfa, es decir más exactamente, en todo el conjunto de las particularidades específicas de la cristaloquímica y sus diferentes propiedades. En otras palabras, los índices tipomorfos de la amazonita son, en primer lugar, sus particularidades cristaloquímicas y morfológicas. En segundo lugar, entre éstos índices también se encuentran diferentes propiedades físicas de la amazonita (por ejemplo, el color, la luminescencia, el pleocroismo, etc.) que a su vez dependen de unas particularidades cristaloquímicas específicas y por lo tanto, de las condiciones concretas de formación y transformación de este feldespato alcalino en diversos ambientes geológicos.

## CONCLUSIÓN

Finalmente, sería conveniente comentar lo siguiente. La amazonita, descrita y utilizada desde la antigüedad, está experimentando en la actualidad una especie, por así decirlo, de segundo nacimiento o, mejor, renacimiento. Y si hace unas decenas de años la amazonita llamaba la atención de los científicos, sólo en su calidad de mineral gemológico por sus matices impresionantes de color, durante los últimos años ha adquirido una importancia práctica innegable. Los mineralogistas contemporáneos han revelado las propiedades sorprendentes de este mineral: la capacidad de acumular elementos alcalinos raros y como consecuencia convertirse en una materia prima potencial para su extracción; la posibilidad de ser utilizada para la determinación de la edad absoluta de varias formaciones graníticas; y, finalmente, servir como el indicador de las particularidades de su génesis. También se ha ampliado el campo de la utilización de la amazonita como un mineral gemológico decorativo. Así, por ejemplo, en la actualidad los macizos grandes de granito con amazonita son explotados en Rusia y Kazajastán y se usan en la industria de la construcción para revestimiento de fachadas e interiores.

Finalmente, vale la pena destacar la posibilidad de utilizar la amazonita como mineral índice de búsqueda y prospección para algunos tipos de yacimientos minerales con contenidos de metales y tierras raras (Ta, Nb, Sn, TR) y de algunos minerales gemológicos (topacio, berilo). Las contradicciones en la evaluación de esta posibilidad están relacionadas con una insuficiencia en el estudio detallado de la posición petrológica y geoquímica de la amazonita, comprensión que serviría de llave para resolver correctamente este problema práctico.

Desde nuestro punto de vista, es necesario reconsiderar el papel de la amazonita en las

prospecciones mineras y geológicas, de una manera concreta. La amazonita, como regla general, aparece en las fases finales de formación de los diferentes tipos genéticos de rocas graníticas y, por lo tanto, representa el índice más claro de la manifestación en estas rocas de procesos geológicos ulteriores (greisenización, albitización y concentración de menas de metales raros) que fueron superpuestos en diversos tipos de yacimientos minerales y que, a su vez, están relacionados con una u otra mineralización específica y de importancia económica. Por esta razón, se puede estimar, de cierta manera, que los yacimientos de amazonita delimitan las áreas de influencia de las formaciones petrológicas potencialmente susceptibles de contener mineralización y pueden servir como guía para la prospección de diversos yacimientos minerales económicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Feldman, L., Beus, A., Kovalenko, A., 1967**, Amazonitization of granitoides with respect to the deposits formation: Nedra, ed., Moscow (in Russian).
- Hofmeister, A.M., and Rossman, G.R., 1985**, A spectroscopic study of irradiation coloring of amazonite: structurally hydrous, Pb-bearing feldspar. *Amer. Mineral.*, 70, 794-800.
- Kovalenko, V., Kuzmin, M., Nagibin, M., 1971**, Granitoides of Mongolia. Nauka, ed., Moscow (in Russian).
- Marfunin, A., and Bershov, L., 1970**, Paramagnetic centers in feldspars and their possible crystalchemical and petrological significance: *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 193, 412-414 (*Doklady Akademi Nauk Translations*, 193, 129-130).
- Ostrooumov, M., 1981**, Typochemical characteristics of amazonite: *Proc. USSR Mineral. Soc.*, 110 (4), 437-448 (in Russian).
- Ostrooumov, M., 1982a**, Amazonstone: *Journal Nature*, 3, 45-43 (in Russian).
- Ostrooumov, M., 1982b**, Structural state of amazonite: *Proc. USSR Mineral. Soc.*, 111 (6), 719-733 (in Russian).
- Ostrooumov, M., 1989**, Typomorphism of amazonite: in: "Amazonite", Nedra ed., Moscow, 169-179 (in Russian).
- Ostrooumov, M., 1991**, L'amazonite: *Rev. gem.*, AFG 108, 8-12.
- Ostrooumov, M., Platonov, A., and Taraschan, A., 1989**, On nature of colour of amazonite: in: "Amazonite", Nedra ed., Moscow, 151-161 (in Russian).
- Ostrooumov, M., 2007**, Amazonita: Mineralogía, Cristaloquímica, Tipomorfismo: Ed. "Politecnica", San Petersburgo, Rusia, 250 p.
- Sánchez, R., y Robles, J., 2002**, Amazonita en la máscara de Malinaltepec, Guerrero: *Arqueología Mexicana*, Vol., X- Núm. 56, p. 7.
- Schmitter, V. E., y Martín Del Campo, R., 1980**, Glosario de especies minerales: Instituto de Geología, UNAM.
- Voloshin, A., and Pakhomovsky, Y., 1986**, Evolution of mineralization in pegmatites of the Kola peninsula: Nauka ed., Leningrad (in Russian).

# El arrecife de Coral

## Un ecosistema planetario como alternativa al calentamiento global

Roger Mauvois<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura – Ciencias de la Tierra, Instituto Politécnico Nacional, México.

\*\* mauvois@m3xico.com

### RESUMEN

Desde una perspectiva geológica, nuestros mares tropicales en el futuro estarán involucrados en la carrera contra el calentamiento global: kilómetros cuadrados de arrecifes coralinos artificiales podrán frenar el incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Si de sobrevivir se trata, no es del todo descabellado imaginar un escenario planetario futuro que involucre miles de kilómetros cuadrados de los mares tropicales, nuestros mares, racionalmente utilizados en la inexorable guerra contra nuestra propia obra: el calentamiento global. Si bien la producción masiva de los gases del efecto invernadero se concentra principalmente en los países de latitudes templadas y boreales, es muy posible que el contraveneno más eficiente se encuentre en las latitudes tropicales, bajo el mar. No seremos, los del sur, los principales causantes del tan temido y anunciado cambio climático global, pero a nuestro alcance puede estar la mejor solución. ¿La podremos aprovechar?

De hecho, las dimensiones del peligro global son tales que preclaros pensadores de nuestro tiempo, no sin razón piensan que, en la actual crisis ambiental, la especie más amenazada es la nuestra, la humana. Nuestras escasas posibilidades biológicas de sobrevivir son, obviamente, muchísimo menores a las de especies que se adaptaron en decenas y centenares de millones de años con todo y los significativos acontecimientos y cambios globales que se dieron en estos plazos. No obstante, muchas de esas especies desaparecieron para siempre, y siguen desapareciendo. Dudamos que nuestra capacidad de razón nos indulte de sufrir las consecuencias lógicas de nuestra sed, nuestra hambre y nuestro desarrollo entrópico, por degradar, a gran escala, la energía del sistema planetario.

Habría que proponer un camino para concebir un remedio, que sea del tamaño (Fotografía 1) de la misma enfermedad: remedio global contra enfermedad global.

*Palabras clave: Arrecifes coralinos artificiales, calentamiento global, efecto invernadero, ecosistema planetario.*

---

**Ponencia presentada por su autor en el III Seminario Internacional sobre Pensamiento Ambiental, que se llevó a cabo en Manizales, Colombia, noviembre de 2007 y cedida para su publicación por el autor a la Revista GeoCiencia SGM**

## ABSTRACT

**F**rom a geological perspective, our tropical seas in the future will be involved in the race against the global warming: square kilometers of coral artificial reefs will be able to stop the increase of CO<sub>2</sub> atmospheric.

*If of surviving it treats, it is not completely crazy to imagine a planetary future scene that involves thousands of square kilometers of the tropical seas, our seas rationally used in the inexorable war against our own work: the global warming. Though the massive production of the gases of the greenhouse effect centers principally in the countries of moderate and boreal latitudes, it is very possible that the most efficient counter-poison is in the tropical latitudes, under the sea. We will not be, those of the south, the principal causers of such a been afraid and announced climatic global change, but to our scope the best solution can be. Will we be able to take advantage of it?*

*In fact, the dimensions of the global danger are such that illustrious thinkers of our time, not without reason think that, in the current environmental crisis, the species threatened is ours, the human being. Our succinct biological possibilities of surviving are, obviously, very much minor to those of species that they adapted in tens and hundreds of million years with everything and the significant events and global changes that were given in these period. Nevertheless, many of these species disappeared forever, and they continue disappearing. We doubt that our capacity of reason reprieves us of suffering the logical consequences of our thirst, our hunger and our development for degrading, on a large scale, the energy of the planetary system.*

*There would be necessary to propose a way to conceive a remedy, which is of the size of the same disease: global remedy against global disease (Photograph 1).*

*Key words: Coral artificial reess, global warming, green house effect, planetary ecosystem.*

Podemos construir tantos arrecifes coralinos artificiales como sea necesario, para frenar el incremento del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico causado por la imparable quema de combustibles fósiles, pira sempiterna en honor a nuestros nuevos dioses: industria, automóvil y, en suma, desarrollo.

Se trata simplemente de estrechar algo como una simbiosis que, sin darnos cuenta, siempre existió (Fotografía 2), a esta escala global, entre el hombre y el arrecife de coral.

## IMPORTANCIA GLOBAL DEL ARRECIFE DE CORAL

Poco a poco se descubre que la zona costera en mares tropicales (Fotografía 3) es la de mayor producción de biomasa del planeta, de mayor eficiencia en producción excedente de oxígeno por fotosíntesis del fitoplancton, y al mismo tiempo, gracias a los arrecifes coralinos, el sumidero más efectivo de carbono en forma de carbonatos. Tres funciones esenciales para la existencia del ser humano. Es probable que la consecuente función negentrópica global de las costas tropicales y de los arrecifes coralinos sea mayor a la de cualquier otro ecosistema del planeta.

Los arrecifes coralinos son, además, de los pocos que sobrevivieron 600 millones de años de turbulencias planetarias. Es esta una notable ventaja que, por otra parte, nos conviene aprovechar. El arrecife es de los principales productores de roca caliza. La caliza es en esencia carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Es así una trampa de  $\text{CO}_2$  como ninguna, lo que hace del fondo del mar con condiciones de sedimentación carbonatada el mejor sumidero de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la historia del planeta.

De la función de los arrecifes como sumidero de carbono dan testimonio los geólogos; ellos

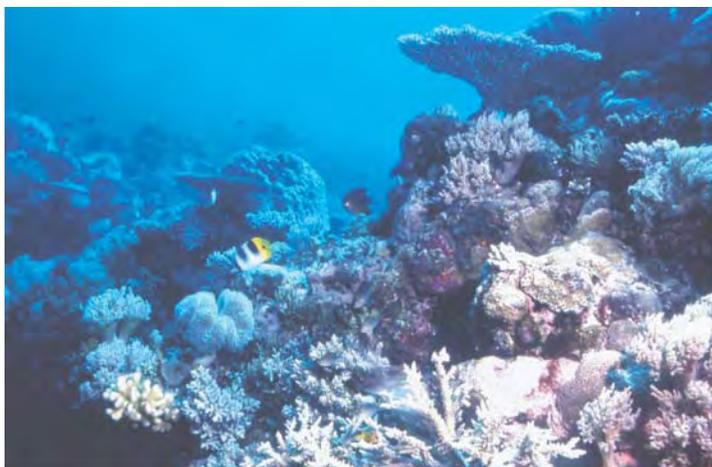


FOTOGRAFÍA 1: Los pólipos de coral en su actividad nocturna. Un remedio global para una enfermedad.

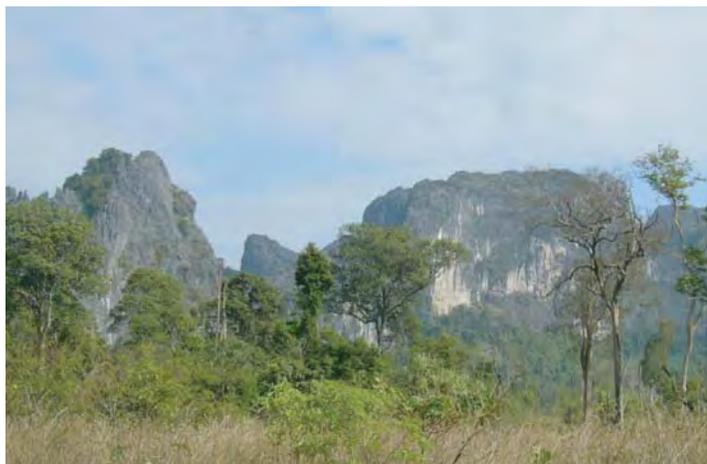


FOTOGRAFÍA 2: Donde rompen las olas, hacia el horizonte la franja blanca que indica la presencia de los arrecifes coralinos a lo largo de la costa oriental de la isla de Martinica (Fotografía de Roger Mauvois)

saben de los centenares de metros, hasta kilómetros, de espesor de sedimentos carbonatados en capas, principalmente calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) (Fotografía 4), depositados en el fondo de antiguos mares de nuestro planeta como mudos testigos de estos remotos tiempos de exceso de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera planetaria. Nos cuentan así del proceso de respiración del planeta que sepulta en los mares tropicales coralinos por millones de años, en forma de calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) los excedentes de  $\text{CO}_2$  liberados a la atmósfera por la vida planetaria durante más de 600 millones de años. Fueron seguramente tiempos de intenso calor global planetario como el que vivimos ya, tiempos de intenso florecimiento de la vida. Desde entonces, hace centenares de millones de años, estas capas quedaron allí sepultadas, aunque, en la actualidad,



FOTOGRAFÍA 3: Profusión de vida entre corales blandos y duros multicolores: superficie del arrecife. Islas Palau. Micronesia. (Fotografía de José Remus)



FOTOGRAFÍA 4: Potentes capas de calizas en algún rincón del sureste asiático (Fotografía de María Luisa Eschenhagen)

se pueden encontrar en las más altas cumbres de nuestro planeta, regresando paulatinamente sus componentes carbono, calcio y algo de magnesio a los circuitos de la naturaleza al ritmo de la erosión y por disolución.

La historia geológica nos enseña otras vías de expulsión del carbono de los ciclos de la biosfera en forma de materia orgánica que se transforma en hidrocarburos y carbón. Es, por cierto, este mismo carbono que alegremente reincorporamos en forma de bióxido de carbono en segundos con sólo quemarlos. Pero hidrocarburos y carbón no representan casi nada en comparación con el enorme volumen alcanzado en las capas formadas por la sedimentación carbonatada. Son centenares de veces más las cantidades de carbono sepultado en forma de rocas carbonatadas que las sepultadas en la forma de combustibles fósiles.

Sin gran ciencia, se puede admirar las calizas a simple vista en gigantescos afloramientos en la Península de Yucatán, en el cañón del Sumidero en Chiapas o en la Sierra Madre Oriental (Fotografía 5), por dar algunos destacados ejemplos mexicanos, o en la mayoría de las fabulosas playas caribeñas de arena blanca (Fotografía 6). Además se ven los edificios carbonatados, los arrecifes coralinos de nuestros mares actuales desde el espacio, antes que las mismas construcciones humanas: es este brillante azul turquesa que bordea en sinuoso festón los continentes y las islas paradisíacas de los mares tropicales (Figura 2).

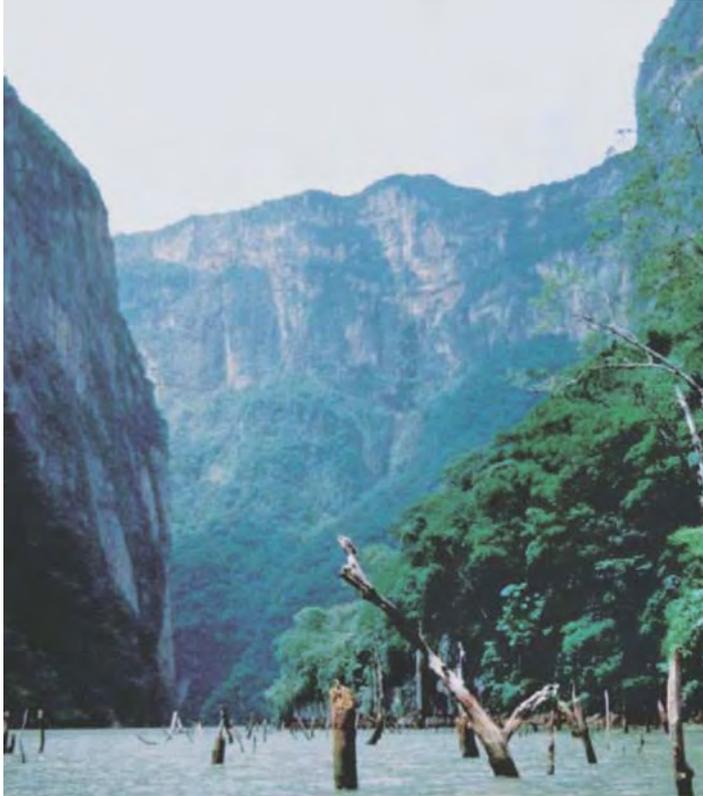
Los arrecifes de coral son simplemente colonias de pólipos (Fotografía 7) en simbiosis con zooxantelas sobre un diminuto soporte de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) construido para fijarse (Figura 1). Esta pequeña base individual es la que entre millones forma la caliza, roca en permanente crecimiento bajo esta costra orgánica de millones de diminutos pólipos que se retuerce, se ramifica a lo largo de los siglos para crecer hacia la luz del sol (Fotografía 8).

A simple vista, suena absolutamente insignificante, la cifra de  $1.14 \text{ g/cm}^2$  en mil años. Es esta la tasa promedio de sedimentación de carbonatos en los mares de nuestro planeta. Esta insignificante tasa, a escala de todo el planeta tierra, implica la captura y sedimentación en los mares de todo el planeta de 1.8 gigatoneladas de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) anualmente. Casi 2,000 millones de toneladas de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Si la información actual es confiable, en esta cantidad se incrementa anualmente el contenido de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera planetaria por la quema de combustibles fósiles.

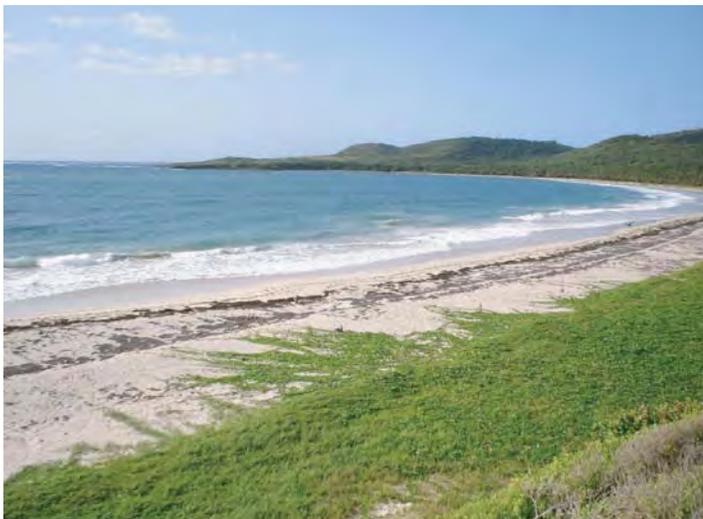
Aseguran los estudiosos que los arrecifes de coral tienen tasas de sedimentación de carbonatos más de 25 veces superiores al promedio citado de  $1.14 \text{ g/cm}^2$  en mil años. Por eso forman esas gigantescas barreras a lo largo de las costas. Es fácil concluir que un incremento sistemático de las áreas ocupadas

por arrecifes coralinos multiplicaría considerablemente el potencial del fondo marino para recibir mayores cantidades de carbonatos de calcio, hasta compensar y rebasar las cantidades totales emitidas por nuestras industrias y automóviles.

¿Utopía? Podría ser simplemente una de nuestras últimas oportunidades.



FOTOGRAFÍA 5: Gigantescos acantilados entre las potentes calizas mesozoicas del sureste de México, Cañón del Sumidero.



FOTOGRAFÍA 6: Típica playa de arenas blancas provenientes de la cercana barrera arrecifal que se adivina en el horizonte (Fotografía de Roger Mauvois)

## EL ARRECIFE DE CORAL EN PELIGRO

Sin entrar en mas detalles sobre la biología y la ecología de los arrecifes, se podrían señalar algunas otras características de la relación hombre - arrecife.

En efecto, esta relación se caracteriza por un intenso deterioro, cada vez mejor documentado, y alarmante, a punto de emergencia mundial si se toma en cuenta el papel de sumidero de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El hombre siempre ha considerado al mar como fuente inagotable de recursos y lo ha utilizado como depósito final de sus desperdicios.

La pesca por sus formas y su intensidad es la razón local del mayor deterioro de los arrecifes coralinos, tanto por lo inadecuado de los implementos: trampas, explosiones, arrastre, venenos y otros, como por las prácticas indiscriminadas: pesca mono específica que daña diversos organismos que no son aprovechados, pesca deportiva, arranque de coral vivo para cal y material de construcción, extracción de animales de ornato como peces y el mismo coral, destrucción de larvas y reproductores en periodos de desove, vertido de desechos de la pesca; todo lo anterior en condiciones de creciente presión por la mayor integración del mercado, el acceso a infraestructura y mejor tecnología, la organización, el crecimiento de la demanda, la elevación de la formación técnica de los pescadores, el incremento general del nivel de bienestar y de educación de las poblaciones involucradas.

El desarrollo urbano, portuario y turístico (Fotografía 9) en zonas costeras arrecifales invade cada vez más al mismo arrecife, lo altera o lo destruye directa o indirectamente y, a veces, aún bajo la pretensión del “ecoturismo” en zonas costeras. La forma indirecta más violenta es probablemente la que consiste en acabar con el vecino manglar son pretexto de

saneamiento. El manglar es el protector más seguro del arrecife de coral por su probada eficacia en detener sedimentos y contaminantes del continente hacia el mar, por ser criadero natural de gran parte de la fauna que participa de los intercambios en la cadena trófica del arrecife y por mantener alejado al hombre, en parte gracias a sus mosquitos.

El turismo en áreas costeras (Fotografía 10), en general, se implanta en áreas de baja calidad de vida, crea condiciones de pérdida de identidad, trastorna los equilibrios sociales y naturales. No hay mejor garante de un arrecife de coral sano que una comunidad ribereña sin pretensiones a las intromisiones modernistas altamente enajenantes y destructoras de la identidad con el mar y su riqueza natural.

Finalmente, todos los trastornos enumerados y los asociados a diversas formas de contaminación y destrucción que involucran los desechos industriales y urbanos, los derrames petroleros, los agroquímicos, el buceo, el mal uso y las fallas del transporte marítimo, la construcción de vías terrestres entre los islotes de las franjas arrecifales y los atolones, todo esto no es nada frente a las consecuencias globales de nuestras acciones, de nuestro desarrollo, como son el hoyo en la capa de ozono y el efecto de invernadero a escala planetaria, nuestras máximas y sustentables aportaciones al estado ambiental de la tierra. Son ya frecuentes las referencias a la muerte masiva por blanqueamiento del arrecife y al probable papel de la radiación ultravioleta y del sobrecalentamiento del mar en provocar este fenómeno.

Es lógico pensar que no estaríamos en los aprietos de padecer, en la actualidad, un incremento "paulatino" del CO<sub>2</sub> atmosférico si no fuera por esta disminución antropogénica, por aniquilamiento, de la propiedad secular de los arrecifes coralinos de sepultar carbonatos y consecuentemente CO<sub>2</sub>. Podría suponerse que los plazos de los fenómenos ambientales, la suave curva que nos muestra el



FOTOGRAFÍA 7: Se logra distinguir los pólipos de coral organizados en colonias en forma de dedos alargados.

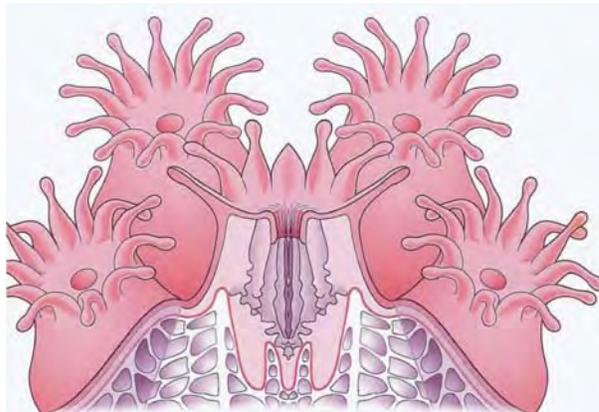


FIGURA 1: Esquema de la estructura de un pólipo, mostrando, en particular, su base de fijación construida de carbonato de calcio.

leve incremento del contenido de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera, año tras año, se vuelve una pared vertical, probablemente infranqueable, en la dimensión temporal de los siglos y milenios.

Surge la buena intención:

- ¿Consecuentemente protejamos, conservemos?

El voluntarismo alimentado por el miedo.

Nos estamos atribuyendo tareas fuera de nuestro alcance, rebasados por las consecuencias de nuestras obras.

Queremos proteger, cuando el primer amenazado es el hombre mismo.

Sí, el protegido es el hombre; protegido por millones de años del delicado hilvanar del tejido natural que lo envuelve, lo arropa, lo consiente, y que él mismo se aferra a destejer, destruir en unos pocos instantes, con su desarrollo y sus guerras. Queda conservar. Pero conservar es la mejor forma de llevar a la extinción. ¿Conservar? Cuando por todos lados se disparan los dardos del cambio al que añadimos constantemente nuevos más mortíferos. Todo está ya manoseado, en proceso permanente de adaptarse a un medio ambiente que nunca ha dejado de transformarse y que se transforma más con nuestro impulso sostenido o sustentable. No hay rincón del planeta fuera del alcance del calentamiento global o a salvo del agujero en la capa de ozono.

¡No sirve ya de nada ni proteger, ni conservar! Ya se afianzó el ritmo de la destrucción generada en milenios por todos nosotros. Siete a diez mil años de agricultor; siglos en la vorágine industrial; decenios inmersos en la revolución cibernética. ¿Quién nos puede parar?

## PROPUESTA

Simplemente, desarrollemos, a gran escala planetaria, nuevos, autosuficientes, altamente productivos campos arrecifales en los desiertos oceánicos, capaces de revertir el incremento del CO<sub>2</sub> liberado por quema de combustibles fósiles en nuestro afán de energía y desarrollo. Pongamos nuestra experiencia de milenios de agricultores, de siglos industriales y de decenios informáticos en una tarea que puede hacer la diferencia de un futuro dominado por las cucarachas.

## MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO

Sabemos que el hombre es parte de una naturaleza en permanente evolución; que en esta evolución la misma naturaleza asimila el

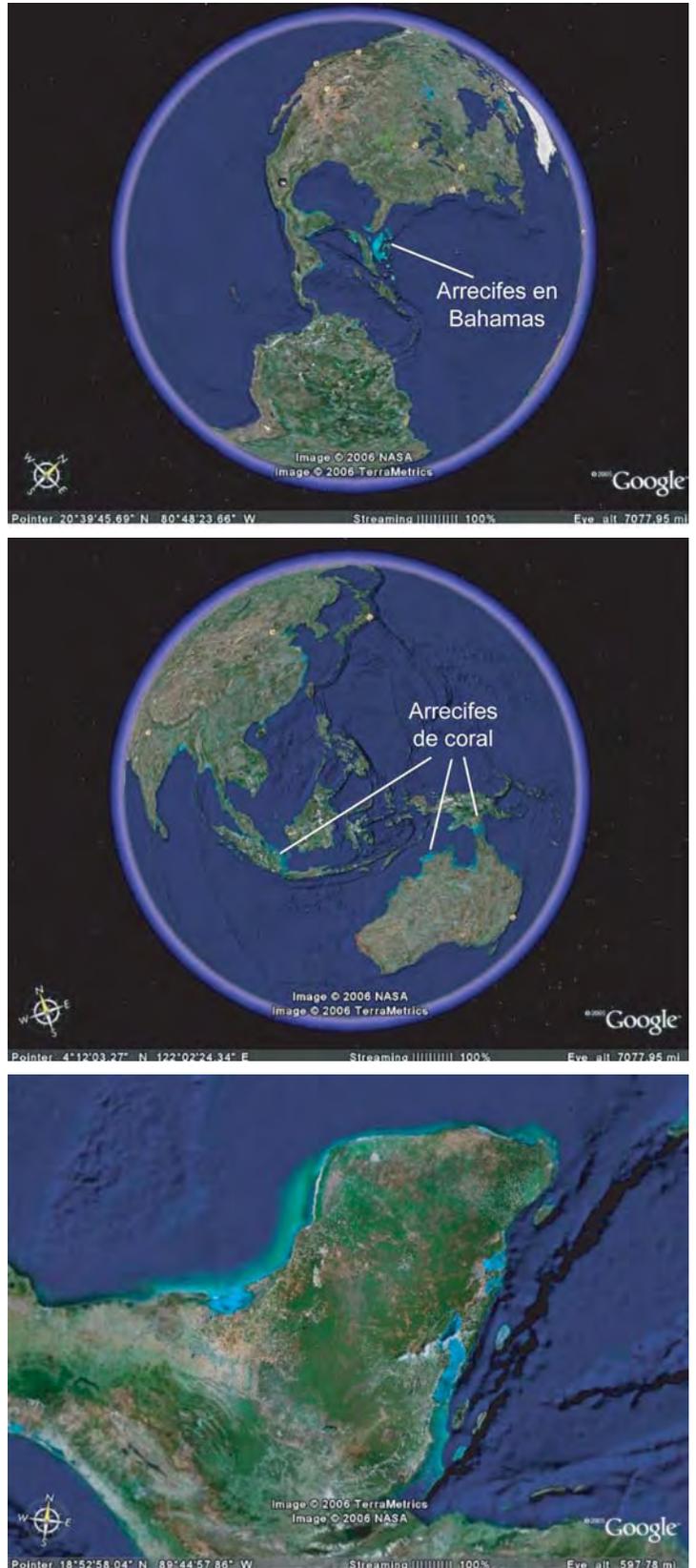


FIGURA 2: a) Festones turquesa de las franjas costeras de Yucatán, Florida, Bahamas (la mancha mayor); b) La mayor extensión planetaria de arrecifes de coral (color turquesa) entre los océanos Índico y Pacífico; c) Arrecifes de coral (color turquesa): Alacranes, Cozumel, Chinchorro y la barrera mexicano-beliceña. (Imágenes Google Earth)



FOTOGRAFÍA 8: *Hacia el sol: coral cuerno de alce. Punta Celarain. Cozumel México. (Fotografía de José Remus)*



FOTOGRAFÍA 9: *Modesto desarrollo turístico (altamente agresivo) en zona costera.*



FOTOGRAFÍA 10: *Las palmeras en Dubai, arrecifes artificiales en el Golfo Pérsico. (Imagen Google Earth)*

ingrediente humano, lo integra ya en todos los intrincados lazos de sus interrelaciones con todos sus atributos, sus canciones y sus guerras.

Estos son algunos principios que sustentan sólidamente las convicciones ambientalistas:

En la dialéctica de la relación hombre-naturaleza, el hombre es naturaleza y, a la vez, negación de ésta. Se regenera así, permanentemente, la nueva naturaleza, integrando al hombre con todas sus creencias y sus mitos.

El hombre es naturaleza porque es resultado de una larga evolución de ella; es naturaleza porque cada fibra, cada célula de su ser es fruto de algún proceso natural, es naturaleza porque es pieza fundamental de su evolución. Es a la vez su negación por ser esencia de lo nuevo. Las formas de la naturaleza humana no se encuentran en la vieja naturaleza, aunque ahí tienen sus antecedentes.

Ya nada, en la naturaleza de nuestro planeta, se mueve sin tener en algún nivel algo que ver con el hombre. Desde lo imponente de los procesos geológicos hasta el microcosmos de los procesos de evolución genética.

La complejidad ambiental se desarrolla en varias escalas de tiempo y del espacio, de ahí la necesidad de matizar en términos de relatividad la percepción de lo cotidiano a lo geológico y de lo local a lo global.

La complejidad ambiental no se da simplemente en la suma de sistemas abióticos, biológicos y sociales, sino, más bien, en la estrecha imbricación de varias formas complejas de movimiento de la materia.

Finalmente, es profunda la convicción que, con el hombre, la naturaleza se conoce un poco mejor a sí misma y ya tiene la plena consciencia de sus límites para seguir ofreciendo cada vez nuevas formas de su adaptación a los cambios que nacen de sus propias entrañas, en esa profunda relación dialéctica que justifica todas las vidas y todas las muertes, hasta la misma extinción o el bien intencionado voluntarismo por sobrevivir.

Para todo asunto relacionado con la Revista Geociencia SGM, escribir a:  
Boulevard Felipe Ángeles Km 93.50-4,  
Col. Venta Prieta,  
C.P. 42080,  
Pachuca, Hgo., México  
Tel. (01 771) 71 142 66  
Email: [jcsalinas@coremisgm.gob.mx](mailto:jcsalinas@coremisgm.gob.mx)  
[editorial@coremisgm.gob.mx](mailto:editorial@coremisgm.gob.mx)

La Revista Geociencia SGM se publica desde abril de 2007.  
Su periodicidad es cuatrimestral y se distribuye  
en forma gratuita al Sector Minero,  
investigación e interesados en Ciencias de la Tierra.

Editado en las Oficinas Centrales  
del Servicio Geológico Mexicano.

Impresión:  
Imiprime Soluciones, S.A. de C.V.

Tiraje: 1 800 ejemplares

# SECTOR MINERO DEL GOBIERNO FEDERAL

**SE**



SECRETARÍA  
DE ECONOMÍA



**DGPM**  
DIRECCIÓN GENERAL  
DE PROMOCIÓN MINERA

promoción de inversiones  
y competitividad

**DGM**  
DIRECCIÓN GENERAL  
DE MINAS

transparencia y  
certeza jurídica



FIDEICOMISO DE  
FOMENTO MINERO

financiamiento, capacitación  
y asistencia técnica



SERVICIO GEOLÓGICO  
MEXICANO

información geológica  
para inversión