



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA

GEOLOGÍA DEL ÁREA SANTA ANA-PEÑAFIEL. DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO Un vistazo a los riesgos geológicos



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A :

YOLANDA GRACIELA GALLAGA ORTEGA



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA

GEOLOGÍA DEL ÁREA SANTA ANA-PEÑAFIEL.
DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO
Un vistazo a los riesgos geológicos

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A :

YOLANDA GRACIELA GALLAGA ORTEGA

**DR. LUIS ENRIQUE MENDOZA PUGA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO
P R E S E N T E.**

PÁGINA

Agradecimientos

Los que suscriben, revisores del trabajo, que como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

INTRODUCCIÓN

C. Yolanda Graciela Gallaga Ortega

Pasantes del Programa Educativo de Ingeniero Geólogo de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la modalidad de **Trabajo de Tesis**, con el Título:

“Geología de la Zona Santa Ana - Peñafiel. Distrito Minero de Guanajuato.”

Un Vistazo a los Riesgos Geológicos

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúen con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustenten examen.

1.5. Metodología

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Capítulo II. GEOLOGÍA

II.1 Marco Geológico

**Atentamente
“La Verdad Os Hará Libres”**

Dr. Juventino Martínez Reyes
Director del Trabajo

M.C. Federico Vogel González
Sinodal del Trabajo

M.C. Juan José Martínez Reyes
Sinodal del Trabajo

C.c.p.- Archivo.

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS GUANAJUATO

Ex-Hacienda San Matías s/n, 36000, Guanajuato, Gto., Tels. (473) 732 22 91, Fax (473) 732 38 64

ÍNDICE

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| Agradecimientos | i |
| Presentación | iii |
| Resumen | iv |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Capítulo I. GENERALIDADES | 3 |
| I.1. Localización del área de estudio | 6 |
| I.2. Antecedentes (Trabajos Previos) | 9 |
| I.3 Hipótesis de trabajo | 9 |
| I.4. Objetivos | 9 |
| I.4.1 Objetivo general. | 9 |
| I.4.2 Objetivos específicos. | 9 |
| I. 5. Metodología. | 9 |
| Capítulo II. GEOLOGÍA | 11 |
| II.1 Marco Geológico Regional | 11 |
| II.2 Estratigrafía | 14 |
| II.2.1 El Mesozoico | 16 |
| II.2.1.1 Complejo Filoniano Santa Ana (Jscf) | 16 |
| II.2.1.2 Formación Esperanza (Kies) | 20 |
| II.2.2 El Cenozoico | 30 |
| II.2.2.1 Conglomerado Guanajuato (Tecg) | 30 |
| II.2.2.2 Formación Losero (Tofl) | 36 |
| II.2.2.3 Ignimbrita Bufa (Toib) | 41 |
| II.2.2.4 Ignimbrita Calderones (Toic) | 44 |
| II.2.2.5 Andesita Cedro (Toac) | 49 |

| | |
|--|------------|
| II.3 Estructuras | 50 |
| II.3.1 Estructuras Mesozoicas | 50 |
| II.3.1 Estructuras Cenozoicas | 53 |
| II.4 Mineralizaciones | 58 |
| Capítulo III. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA | 63 |
| Capítulo IV. RIESGOS GEOLÓGICOS | 67 |
| IV.1 Introducción | 67 |
| IV.2 Desprendimiento de bloques de roca | 69 |
| IV.3 Presas de Jales Activas e Inactivas | 80 |
| V. CONCLUSIONES | 88 |
| Bibliografía | 91 |
| Índice de Figuras | 102 |
| Índice de Tablas | 104 |

Comenzó y se llegó al final de un camino en el que la esperanza y la ilusión de trascender se hacían presentes cada día, dirigiendo los pasos hasta encontrarse con el Amor que estuvo en cada letra, en cada roca, en cada pregunta, en cada conocimiento nuevo....en cada verdad encontrada.

AGRADECIMIENTOS

A mi queridísima Alma Mater, espacio insustituible en el que la vida me ha permitido trascender y vivir mi vocación.

A los Profesores y Alumnos del entonces Centro de Investigaciones en Química Inorgánica y, en especial, a todos mis Maestros, Compañeros y Amigos de nuestra querida Escuela de Minas. **Los nuevos tiempos borrarán nombres y estilos, pero nunca la esencia por la que fueron creados.**

A los Maestros y Amigos Elia Mónica Morales Zárate, Federico Vogel González y Juan José Martínez Reyes, por compartir conmigo no sólo la hermosa vocación de la Docencia, sino también su Amistad. Y al Dr. Juventino Martínez Reyes, por su paciencia, sus invaluable enseñanzas y por su desinteresado afán de dar a conocer el maravilloso mundo de la Geología.

Al Fin Último y Causa Primera, Uno e Inmutable por esencia, el único en quien toda la vida y actividad humana tiene sentido.

DEDICATORIAS

A quienes han querido quedarse conmigo siendo parte de mi historia,
y que puedo llamar inequívocamente, amigos.

A mis alumnos, que me han permitido trascender
a través de la noble tarea de la docencia.

A todas las personas que me han acompañado en la búsqueda diaria de Dios y que
me han ayudado a reconocer que aunque se diga que pueden ser muchos los
caminos, el único válido, es el del Amor.

A Nuestra Señora de Guanajuato.

Y a mi Amada Familia, apoyo incondicional en mis locuras y aventuras, por quien
soy, vivo y espero el encuentro definitivo con el Amor que genera Eternidad.
Fuimos formados con el ejemplo de DOS GRANDES ROCAS
que nunca se dejaron fracturar.

“Un antiguo y nuevo dolor, que no cesará nunca mientras haya vida y conciencia.
Un dolor que marcó el corazón para siempre y que sigue tan vivo como aquella
madrugada de martes en la que toda nuestra vida cambió. ¿Por qué no termina ya
todo, Mamá? Y Dios permita que ya estemos juntas. Tanto luchar, tanto pensar,
tanto caminar...¿me llevarán a ti?”

23 de septiembre de 2010

A tantos años de distancia y pareciera, sin embargo, que acaba de suceder. ¿Dónde
estás? ¿Nos miras, nos observas, nos cuidas? ¿Estás bien? Tú, suspendido en el
tiempo y en la inmensidad de la infinitud de Dios...¿Cómo serás? ¿Sigues amando?
Tan cerca, tan lejos...tan rápido, tan lento...Dios te cuide Papá.

21 de mayo de 2008

PRESENTACIÓN

Contemplando un día de mayo parte de la Sierra de Guanajuato, surgieron en mí algunas preguntas: *¿Cómo se formaron esas montañas? ¿De qué están hechas? ¿Cuándo ocurrió....?.* Y necesitaba respuestas. Entonces comenzó una nueva aventura en mi vida.

El camino inició entre adaptaciones e indecisiones, entre el disfrutar por el nuevo conocimiento y la mortificación de retomar el método de estudio, ya en tiempos muy pasados ejercido. Pero en ese camino, Dios colocó a personas que nunca imaginé que podría conocer: excelentes Profesores, que al compartirme sus conocimientos en esta maravillosa disciplina, no sólo me permitieron prácticamente vivir en sus espacios, sino sobre todo abrirme las puertas de su corazón; maravillosos compañeros y amigos que rompiendo sin escrúpulos la barrera generacional, jóvenes con inquietudes y necesidad de conocer más de nuestras amadas rocas, me ofrecieron su amistad y compañía haciéndome sentir uno de ellos.

El gusto por la Geología no es casual; estoy convenida que se hereda. Y yo lo heredé de mi Padre, a quien tanto le debo y de quien tanto lamento no haber aprendido. Su pasión por las Minas lo llevó a recorrer desde su juventud innumerables caminos de México desde épocas donde solamente existían cuerdas para llegar a los diferentes rincones de la mina, hasta sus últimos días en que deseaba ardorosamente estar de nuevo de pie para entrar por última vez a esos amados rincones.

A él dedico amorosamente este trabajo, que si bien es muy pobre, podrá hacer honor a toda su contribución y cariño que le brindó a cada día de su labor y a cada parte de su vida que dejó en los más oscuros nidos de la Tierra.

RESUMEN

Avanzando el imperio español en la conquista de México, sus protagonistas nunca se imaginaron que un día del año 1548, cambiaría el curso de la historia de una región habitada por pequeñas poblaciones de aguerridos chichimecas, y se convertiría en una tierra de poder y contrastes, de condes, marqueses y barreteros, y en el tesoro más grande y envidiado de la época colonial.

Esa región es lo que ahora se conoce como el Distrito Minero de Guanajuato y desde esa época muchos han sido los estudios que se han realizado en el área. Este trabajo contribuye en parte a continuar su conocimiento mediante un estudio geológico de una zona de aproximadamente 15 km² comprendida entre las comunidades de Santa Ana al NW y Peñafiel al SE, Guanajuato, del cual se generó una Carta Geológica a escala 1:5,000 teniendo a la Veta Madre en su parte central y en esa misma dirección, de donde se ha logrado un estudio más detallado de las condiciones geológicas de dicha área y la actualización de la información que se presenta en otros documentos.

Se presenta un análisis y valoración bibliográficos exhaustivo de la estratigrafía de la zona con objeto de unificar tanto las características de las formaciones como su designación. Ésta incluye, del Mesozoico, al Complejo Filoniano Santa Ana al NW y la Formación Esperanza al E; esta última comprende una interestratificación de rocas tipo lavas, calizas y filitas, las cuales no se habían cartografiado antes con estas designaciones. Las rocas del Cenozoico comprenden el Conglomerado Guanajuato, la Formación Losero, la Ignimbrita Bufa, la Ignimbrita Calderones y la Andesita El Cedro.

Hacia el NW del Distrito, las rocas del Complejo Filoniano Santa Ana se identificaron anteriormente como Diorita La Luz; hacia el E de la Veta Madre, las lavas de la Formación Esperanza también habían sido cartografiadas como dioritas.

Las estructuras mesozoicas de la zona corresponden a pliegues, foliación, deformación milonítica, cizallamiento y cabalgaduras producidos por esfuerzos compresivos de las Orogenias Oregoniana y Larámide y observados principalmente en las rocas de la Formación Esperanza. Las estructuras cenozoicas, debidas a esfuerzos tensionales, son fracturas y sobre todo fallas de tipo normal con dirección NE-SW como las Fallas La Aldana, Del Amparo, San Clemente, Las Escobas y Chichíndaro, las cuales intersectan a la estructura NW-SE más importante del Distrito, la Veta Madre.

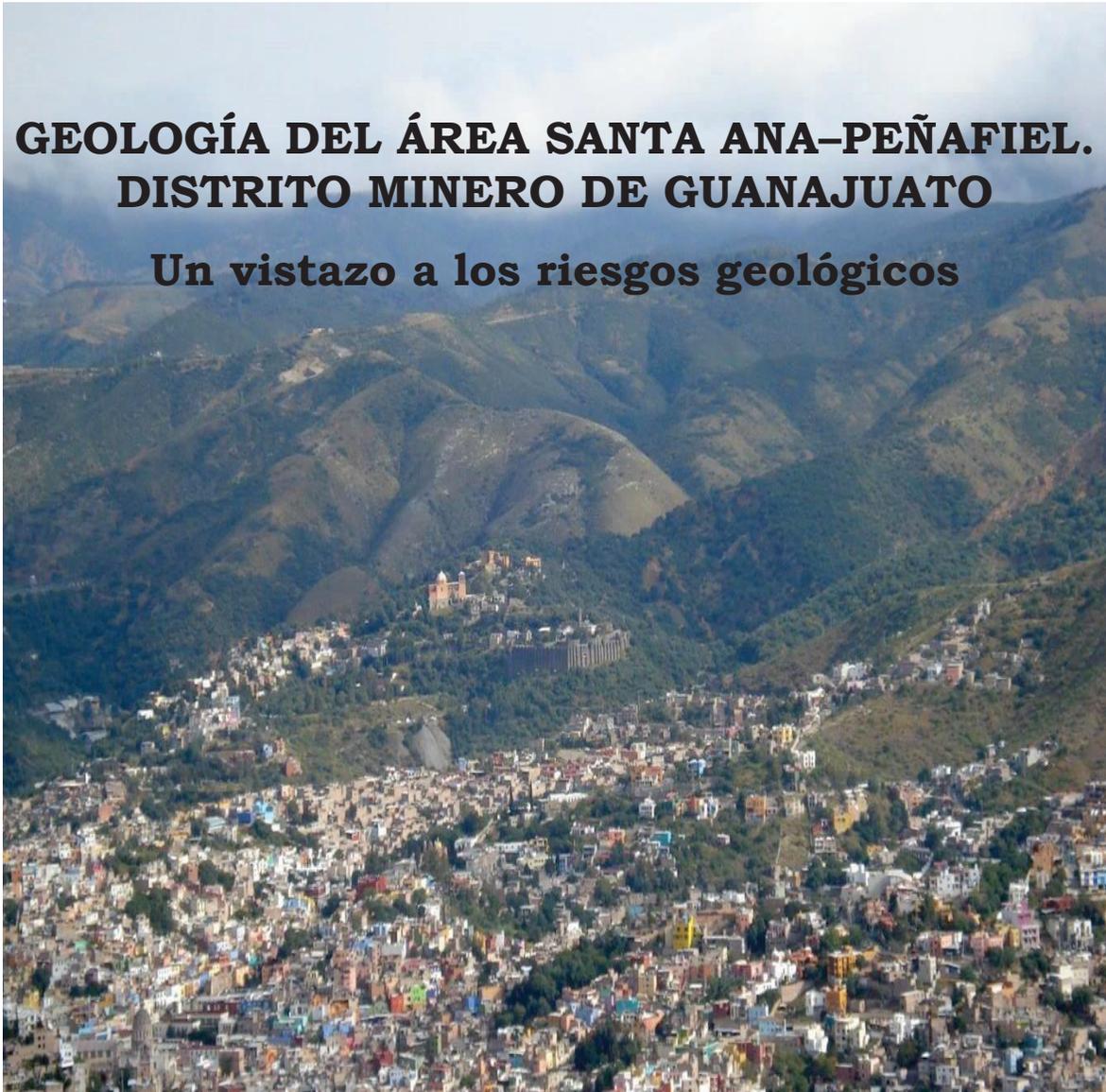
Por otro lado, la Veta Madre, en su despliegue NW-SE, pone en contacto tectónico a las rocas mesozoicas del Complejo Filoniano con las de la Formación Esperanza; también a ésta con el Conglomerado Guanajuato y las Ignimbritas Bufa y Calderones del Cenozoico. La Falla La Aldana, al NW de la zona, relaciona el Complejo Filoniano con el Conglomerado Guanajuato y la Falla Las Escobas a la Formación Esperanza con el Conglomerado Guanajuato y con la Ignimbrita Calderones. Finalmente, en la zona Sur del área, la Falla Chichíndaro desplaza la Ignimbrita Calderones y la pone en contacto con el Conglomerado Guanajuato, la Ignimbrita Bufa y la Formación Losero.

En la ladera Este del Cerro de El Meco se presenta una zona de alteración hidrotermal producida por un fallamiento con aparente mineralización, observándose vetilleo y rocas con textura brechoide.

Finalmente, en el área de estudio se analiza la presencia de algunos riesgos geológicos importantes: deslizamiento de rocas y flujo de lodos de los materiales de los jales. El primero se presenta en la zona del Cerro El Meco y la carretera de acceso al Mineral de Peñafiel; el segundo en el área de la comunidad de La Valenciana. Los pocos estudios a este respecto y la peligrosidad por la cercanía de zonas habitadas, hace necesario la implementación de programas permanentes de monitoreo y concientización a la sociedad.

GEOLOGÍA DEL ÁREA SANTA ANA-PEÑAFIEL. DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO

Un vistazo a los riesgos geológicos



“El hombre echa mano al pedernal, descuaja las montañas de raíz; y abre galerías en la roca, atenta la mirada a todo lo precioso; explora los hontanares de los ríos y saca a luz riquezas escondidas. Pero la sabiduría, ¿de dónde se saca?, ¿dónde está el yacimiento de la prudencia?”

Job 28, 9-12

INTRODUCCIÓN

*“¿Dónde estabas cuando cimenté la Tierra? Dímelo, si es que sabes tanto.
¿Quién señaló sus dimensiones? ¿Quién aplicó la cinta de medir? ¿Dónde
encajan sus cimientos?, ¿quién su piedra angular fundamentó, ante el
aplauso de los astros matutinos y entre las aclamaciones
de los ángeles de Dios?”*

Job, 38

INTRODUCCIÓN

La fecha de la institución del Distrito Minero de Guanajuato no se reporta con claridad. Orozco (1921) habla de “*regiones mineras*”, ocupando el término “*distrito*” para lo que en ese tiempo eran los municipios¹. Antúnez (1964) por su parte menciona que en febrero de 1885 se estableció legalmente la Diputación de Minería de Guanajuato, comprendiendo, entre otros, los *partidos*, de Guanajuato y La Luz.²

Desde su descubrimiento a mediados del siglo XVI, la fama de esta región por la riqueza en oro y plata de sus vetas ha sido ampliamente conocida. Antaño, por su gran relevancia en la producción de estos metales preciosos, esa fama trascendió más allá de nuestras fronteras. En nuestros días la minería aún guarda cierta relevancia como actividad de la población.

Sin embargo, a pesar de su pasado glorioso en la producción de metales preciosos, el Distrito Minero de Guanajuato geológicamente no ha sido suficientemente estudiado, aunque en las últimas décadas se ha venido avanzando en este sentido. De esta manera, cualquier contribución que pueda proporcionar información para continuar conociendo esta zona, aunque sea modesta, es significativa. Es el caso de la presente tesis.

El trabajo consistió en el estudio geológico de una pequeña área del Distrito Minero de Guanajuato, con una superficie aproximada de 15 km² comprendida entre la comunidad de Santa Ana al NW, hasta las inmediaciones del Mineral de Peñafiel al SE. La falla de la Veta Madre la atraviesa con esa dirección en su parte central.

¹ Orozco, Rafael (1921) *La Industria Minera de México. Distrito de Guanajuato*, Secretaría de Industria, Comercio y Trabajo, Secretaría de Educación Pública, pp. 12-14.

² Antúnez E., F. (1964) *Monografía Histórico-Minera sobre el Distrito de Guanajuato*, Comisión de Recursos Naturales No Renovables, Publicación 17E, pp. 106 y 177.

En esta tesis se aborda por primera vez el estudio geológico de esta pequeña porción de la Veta Madre bajo la óptica de la cartografía geológica a escala 1:5,000, visión que ha facilitado el análisis más detallado de las condiciones geológicas que prevalecen en el área. Así, puede considerarse que un resultado relevante de este trabajo ha sido la generación de la carta geológica a escala 1:5,000, lo que ha permitido presentar algunas consideraciones relativas a los riesgos geológicos que existen en la zona.

Se puntualiza el encuadre del trabajo, con la ubicación del área de estudio, el planteamiento de la hipótesis, objetivos y la metodología empleada (Capítulo I), además de una revisión de los trabajos previos más importantes sobre la geología de la región. En seguida, se ubica el área dentro de un contexto geológico regional, a la escala de la Sierra de Guanajuato (Capítulo II), para después abordar el estudio geológico propiamente dicho de la zona de trabajo, en donde se contemplan los aspectos estratigráficos y petrográficos de las formaciones rocosas allí presentes, las estructuras tectónicas que afectaron a esas rocas, así como las mineralizaciones que en distintas épocas geológicas se alojaron.

En un capítulo aparte (Capítulo III) se repasa la historia geológica de la región a través de la elaboración de una tabla para interpretar la evolución del área de estudio. Finalmente, y como un aspecto importante que debe ser considerado, se aborda el aspecto de los riesgos geológicos (Capítulo IV) que presenta la zona, específicamente los *deslizamientos* o *caída de bloques* inminentes en su porción suroriental, ya que existen pocos o limitados trabajos sobre este tema.

Además del trabajo de campo que fue fundamental para la elaboración de la carta geológica a escala 1: 5,000 del área de estudio (anexa) para este trabajo de tesis, se analizó y valoró exhaustivamente la bibliografía más importante que pudo compilarse al inicio y durante el desarrollo de la misma.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

“La verdad de la Ciencia no es para el propio bien o vanidad, sino que debe ser practicada para derramar Luz sobre la Verdad de Dios”.

Wilhelm C. Roentgen
Descubridor de los Rayos-X

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

I.1.- Localización del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en el centro del país, hacia la parte noroccidental de Estado de Guanajuato (Figura I.1), ubicándose hacia la parte suroriental de la Sierra de Guanajuato, en lo que se conoce como Distrito Minero de Guanajuato (DMG) (Figura I.2). La ciudad de Guanajuato le da el nombre a este Distrito.



Figura I.1 Localización geográfica del Área de Estudio en el marco del Estado de Guanajuato.



Figura I.2 Localización geográfica del Área de Estudio en el marco de la Sierra de Guanajuato.

Dentro del DMG, la zona de estudio se extiende desde las inmediaciones de la comunidad de Santa Ana al NW hasta la vecindad del mineral de Peñafiel al SE, entre las coordenadas UTM 265,000 a 268,000 E y 2 325,000 a 2 330,000 N, cubriendo una superficie aproximada de 15 km².

Fisiográficamente esta área se ubica en la zona de transición entre las provincias de la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Mexicano (Figura I.3).

La *Mesa Central* se caracteriza por ser una región elevada constituida por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, cubiertas en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas. Las llanuras más extensas se localizan en la zona de los Llanos de Ojuelos; en la zona de los Altos de Guanajuato, las llanuras son menos extensas y las sierras más frecuentes, presentándose dos discontinuidades fisiográficas: la *sierra de Guanajuato*, con una serie de valles paralelos orientados al sureste y la *sierra Cuatralba*, de mesetas de lava escalonadas. Su altitud promedio es de 1700 a 2300 msnm; las mayores elevaciones llegan a 2500 metros de altitud en la sierra de Guanajuato.¹

El *Cinturón Volcánico Mexicano*, por su parte, se encuentra ubicado en el centro del territorio mexicano formando una ancha faja de 130 km y extendiéndose desde el Océano Pacífico en la Costa Occidental en la desembocadura del río Grande Santiago a la Bahía de Banderas hasta el Golfo de México, en el Pico de Orizaba y Cofre de Perote, alcanzando 880 km de longitud. Es la provincia más alta del país, así como una de las de mayor variación de relieve y de litología. Se considera como una enorme masa de rocas volcánicas, derrames de lava y otras manifestaciones ígneas de la era Cenozoica. Esta importante estructura determina el límite físico entre el Norte y Centroamérica, así como el límite altimétrico, orográfico y climatológico.²

¹ <http://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/relieve-de-mexico/index.html> (fecha de consulta: 5 de mayo de 2016).

² Ídem.



Figura I.3 Localización del Área de Estudio en el marco de las provincias fisiográficas de la República Mexicana.³

Geológicamente el área de estudio se localiza hacia la terminación suroriental de la Sierra Madre Occidental, región donde confluyen las provincias geológicas de la Sierra Madre Oriental y del Cinturón Volcánico Mexicano (Figura I.4).

La Sierra Madre Oriental está constituida por una gruesa secuencia de sedimentos marinos mesozoicos, esencialmente jurásicos y cretácicos. La Sierra Madre Occidental está representada por una espesa acumulación de efusiones ignimbríticas de composición riolítica y de edad oligocénica. En cuanto al Cinturón Volcánico Mexicano, está compuesto de diversos materiales volcánico y volcanoclástico de composición andesítico-basáltica que abarca desde el Paleógeno Superior (Oligoceno)⁴ hasta el Neógeno (Mioceno).⁵

³ www.monografias.com/trabajos100/regiones-fisiograficas-mexico/regiones-fisiograficas-mexico.shtml (fecha de consulta: 6 de mayo de 2016). La figura presenta un error ortográfico de origen: dice *Occidental*; debe decir *Occidental*.

⁴ Morán Zenteno, D. (sin año) *Geología de la República Mexicana*, INEGI-UNAM, p. 56.

⁵ Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005) *Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, núm. 3, p. 229.



Figura I.4 Localización del área de estudio en el marco de la geología de la República Mexicana.⁶

I.2.- Antecedentes (Trabajos previos)

Según se relata en diversas obras, es a mediados del siglo XVI cuando se descubrió por primera vez la mineralización de metales preciosos en la región. La riqueza mineral que encierran sus vetas ha sido conocida desde hace mucho tiempo. Su fama en la producción de plata y oro ha trascendido más allá de nuestras fronteras.

En sus inicios la explotación mineral del DMG no presentaba mayor dificultad, en virtud de que la mineralización aparecía a flor de tierra; la ciencia geológica era desconocida en el medio y no se hacía necesaria para la prospección minera. Los estudios geológicos propiamente dichos aplicados a este sector aparecieron hasta el siglo XX.

⁶ <http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/index.php/difusion-y-divulgacion/212-carta-geologica-de-la-republica-mexicana> (fecha de consulta: 5 de mayo de 2016).

En las últimas décadas se han venido impulsando proyectos académicos para el conocimiento de la geología de la región que han permitido un avance significativo de esta disciplina. Las metodologías modernas empleadas y el rigor científico empeñado en tales trabajos, han cambiado los conceptos y modelos de la evolución geológica del área. La Tabla I.1 sintetiza algunos de los trabajos que se han realizado en la región, los cuales constituyen los antecedentes más importantes que han contribuido a su conocimiento geológico.

Tabla I.1. Relación de aportes al conocimiento geológico del Distrito Minero de Guanajuato.

| AUTOR Y OBRA | APORTACIONES |
|--|--|
| Pedro López Monroy (1888) <i>Las Minas de Guanajuato. Memoria Histórico-Descriptiva de este Distrito Minero.</i> | Nombra a las rocas intrusivas de color verde como Formación Diorita La Luz (Rocas Verdes), ya que afloran en el Mineral de La Luz, Gto. y sus alrededores. Separa al Conglomerado Guanajuato de la arenisca tobácea, a la que llamó Losero. |
| Botsford, C.W. (1909) <i>The Zacatecas District and its Relation to Guanajuato and Other Camps.</i> | Asigna al basamento metamórfico como Triásico-Jurásico al realizar sus correlaciones con rocas semejantes en Zacatecas, México. Usa por primera vez el término Conglomerado Rojo de Guanajuato. |
| Rafael Orozco (1921) <i>La Industria Minera de México.</i> | Describe pizarras arcillosas de Guanajuato, sin fósiles de una edad precretácica y semejante a las de Zacatecas, siendo la roca encajonante de la mayor parte de los yacimientos minerales. Menciona la presencia de rocas diabásicas (“rocas verdes”) en las barrancas de Esperanza, La Calera y La Concepción, de andesitas de hiperstena y augita en forma de corrientes y riolitas que forman un cuello volcánico en el Cerro de Chichíndaro. Describe el Conglomerado Rojo con presencia de areniscas rojas y areniscas verdes las cuales son tobas volcánicas de la formación locero (sic) con un espesor de más de 400 m. |
| Alfred Wandke y Juan Martínez (1928) <i>The Guanajuato Mining District Mexico.</i> | Realizan un ordenamiento estratigráfico considerando a las calizas y lutitas triásicas como las rocas más antiguas y las separan de los Basaltos La Luz que las sobreyacen. Asignan al Conglomerado Guanajuato un espesor de menos de 600 m. Lllaman a la arenisca tobácea que sobreyace al Conglomerado como Arenisca Bufa y sobre ésta una unidad riolítica con espesor de 400 m, seguida de tobas, brechas y corrientes andesíticas. La última unidad es un pórfido de cuarzo. |

TABLA I.1 Relación de aportes al conocimiento geológico del Distrito Minero de Guanajuato (continuación)

| AUTOR Y OBRA | APORTACIONES |
|--|--|
| Carl Fries, Jr., Claude W. Hibbard y David H. Dunkle (1955) <i>Early Cenozoic Vertebrates in the Red Conglomerate at Guanajuato Mexico.</i> | Asignan la edad del Conglomerado Rojo de Guanajuato una edad pre-oligocénica temprana con el estudio de un cráneo de roedor, el cual fue encontrado en la zona Sur de la ciudad de Guanajuato. |
| J.D. Edwards (1956) <i>Estudio sobre algunos de los conglomerados rojos del Terciario Inferior del Centro de México.</i> | Divide el Conglomerado Rojo de Guanajuato en dos miembros separados por una discordancia. Al miembro inferior le asignó un espesor de 900 a 1300 m y al superior de 170 a 700 m. Analiza los fósiles encontrados en calizas dentro del Conglomerado, considerando pertenecen a las del basamento y le asigna una edad del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano. |
| Francisco Antúnez E. (1964) <i>Monografía Histórico Minera sobre el Distrito de Guanajuato.</i> | Describe la geología del Distrito Minero de Guanajuato integrando los trabajos de C.W. Botsford, J.E. Edwards, Alfred Wandke, Ponciano Aguilar y del autor. Divide a las rocas del Distrito en Triásicas y Terciarias y Post-Terciarias. Las rocas Triásicas son calizas y pizarras, efusivos ácidos, basaltos (“La Luz”) y diorita intrusiva. En las rocas Post-Triásicas ubica al Conglomerado Rojo de Guanajuato, la Arenisca de La Bufa o “Losero”, Riolitas, Andesita de Calderones, Andesita de hiperstena, Pórfido cuarcífero, diques y granito. |
| José Echegoyén S., Saúl Romero M. y Sergio Velázquez S. (1970) <i>Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato.</i> | Describen la geología del Distrito en su estratigrafía, estructuras, historia geológica y yacimientos minerales. Se asignan los nombres de Formación Esperanza para las rocas sedimentarias y metamórficas del Triásico-Jurásico, Riolita Bufa a rocas volcánicas del Terciario y Riolita Chichíndaro a rocas volcánicas del Cuaternario. También se describen las rocas intrusivas del Terciario: Diorita La Luz, Intrusivo Mata, Intrusivo Peregrina, Intrusivo Cedro e Intrusivo Chichíndaro. Incluye la edición de cuatro cartas geológicas a escala 1:10,000: Hoja Guanajuato, Hoja Esperanza, Hoja Cubo y Hoja Monte de San Nicolás, esta última sin la litología. |
| Juventino Martínez Reyes (1987) <i>“Excursión a la Sierra de Guanajuato; parte 1, Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato”</i> y (1992) <i>Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato</i> | Estos trabajos presentan la columna estratigráfica en general de la Sierra de Guanajuato, y en particular del Distrito Minero de Guanajuato. Se asignan los nombres Tonalita Cerro Pelón y Diorita La Palma a rocas del mesozoico que no habían sido denominadas anteriormente. También se reporta la Diorita La Palma con el nombre de Complejo Filoniano Santa Ana, dado por Monod (1990) y el Complejo Volcanosedimentario, utilizado por este autor para designar la unidad litológica que agrupa a las rocas sedimentarias y volcánicas marinas de la región. |

I.3.- Hipótesis de trabajo

El área de estudio es muy conocida y su estudio ha sido abordado desde hace mucho tiempo bajo diferentes perspectivas y a diversas escalas. La visión de este trabajo es la de realizar un estudio a una escala baja (1:5,000) que permita observaciones geológicas más detalladas.

I.4.- Objetivos

I.4.1 Objetivo general

Abundar en el conocimiento geológico de la región en el sentido más estricto del término, considerando que la Geología es la Ciencia de la Tierra.

I.4.2 Objetivo específico

Contribuir al conocimiento geológico del área comprendida entre la comunidad de Santa Ana y el mineral de Peñafiel a la escala 1:5,000 para generar un documento cartográfico actualizado y con mayor detalle el cual sirva para registrar las zonas de riesgos geológicos potenciales.

I.5.- Metodología

La metodología seguida para realizar este trabajo ha sido la que generalmente se emplea en proyectos geológicos. Se utilizaron los instrumentos que para este caso permite la tecnología actual como son el sistema de posición geográfica (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG). De igual modo, se utilizaron la brújula y demás materiales propios de esta disciplina.

Se inició con la compilación, análisis y valoración de los trabajos publicados sobre la región a la que pertenece el área de estudio, seguido del trabajo de campo para la elaboración de la Carta Geológica y las observaciones detalladas de la estratigrafía y estructuras. Con los datos recabados se procedió a elaborar el documento final.

La compilación y revisión bibliográfica exhaustiva incluyó publicaciones en revistas científicas diversas, informes inéditos y trabajos de tesis profesionales. Esta actividad se continuó en paralelo con la interpretación de fotografías aéreas ortogonales de la zona a escala 1:5,000.

El trabajo de campo consistió en recorrer el área en su totalidad con el propósito de obtener la cartografía geológica y diversos datos estratigráficos, estructurales, así como realizar diversas observaciones pertinentes al proyecto. Esta etapa se consideró la más importante y necesaria para el desarrollo y conclusión del trabajo.

Los datos compilados tanto en campo como de las fotografías fueron la base de la elaboración del documento final para la generación de la Carta Geológica y su digitalización en un sistema de información geográfica (SIG).

CAPÍTULO II

GEOLOGÍA

*“Nosotros conocemos las cosas porque son,
pero ellas son porque Tú las conoces”.*

San Agustín

CAPÍTULO II.- GEOLOGÍA

II.1.- Marco Geológico Regional

Como se mencionó en el Capítulo I, el área de estudio se localiza en el Distrito Minero de Guanajuato (DMG) el cual a su vez se ubica hacia la porción suroriental de la Sierra de Guanajuato.

La Sierra de Guanajuato es un entidad geológica ubicada en el centro del país, en la convergencia de tres de las grandes provincias geológicas de la República Mexicana (ver Figura I.3): la Sierra Madre Oriental representada por una gruesa secuencia de formaciones marinas del Jurásico y el Cretácico, la Sierra Madre Occidental, representada por espesas efusiones ignimbríticas paleógenas de composición riolítica y el Cinturón Volcánico Mexicano, representado por materiales volcánicos neógenos de composición basáltico-andesítica.

En este contexto regional, la Sierra de Guanajuato posee una geología muy singular. Allí se pueden individualizar dos conjuntos litoestratigráficos bien definidos: uno inferior, basal, representado por diversas unidades volcano-plutónicas de edad Jurásico Superior (Piroxenitas San Juan de Otates, Complejo Filoniano Santa Ana, Tonalita Cerro Pelón, Diorita Tuna Mansa, Basaltos La Luz), alóctonas sobre una formación volcanosedimentaria del Cretácico inferior llamada Formación Arperos (Figura II.1); otro superior que cubre al anterior, de naturaleza continental, de edad cenozoica, representado por diversos materiales clásticos, volcánicos y piroclásticos de diverso origen y composición. Entre estos dos conjuntos aparece un cuerpo plutónico de dimensiones batolíticas que intrusióna al conjunto basal mesozoico pero no a la cubierta volcano-clástica cenozoica: el Granito Comanja.¹

¹ Martínez-Reyes, J. (1992) *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato* escala 1:100,000, con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Serie de Cartas Geológicas y Mineras, 8, México, D.F., 1 mapa con texto.

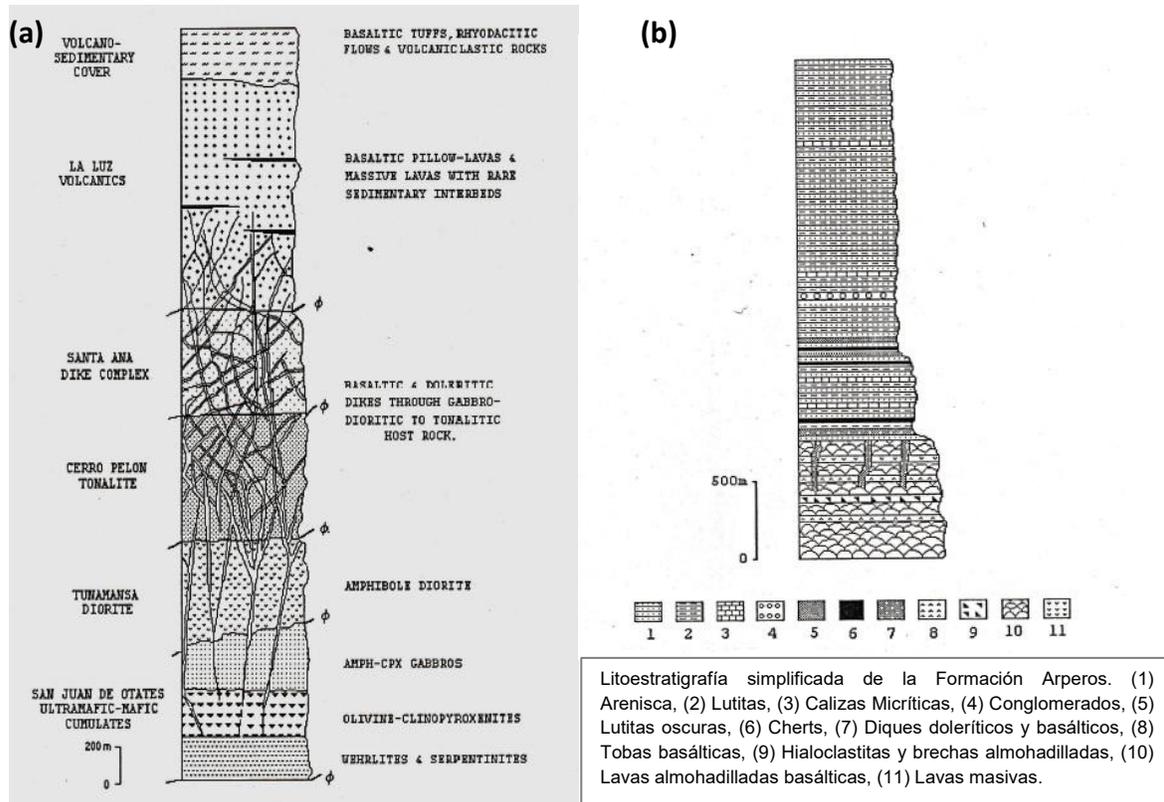


Figura II.1. Columnas estratigráficas de los conjuntos basales de la Sierra de Guanajuato: (a) Arco Guanajuato y (b) Formación Arperos.²

La secuencia volcano-plutónica del conjunto basal ha sido considerada como los vestigios de las raíces de un arco insular intraocéanico, el Arco Guanajuato³ perteneciente al Terreno Guerrero, mientras que la formación volcanosedimentaria representa los depósitos de una cuenca marina de naturaleza oceánica, la Cuenca de Arperos.⁴

² Tomada de Ortiz-Hernández, L.E. y Martínez-Reyes, J. (1993) *Geological Structure, Petrological and Geochemical Constraints for the centralmost segment of the Guerrero Terrane (Sierra of Guanajuato, Central Mexico)*, First Circum-Pacific and Circum Atlantic Terrane Conference, Guide Book of Field Trip C, Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México, Guanajuato, Gto., México, pp. 7 y 9.

³ Monod, O., Lapierre, H., Chiodi, M., Martínez R., J., Calvet, P., Ortiz, E., Zimmermann, J.L. (1990) *Reconstitution d'un arc insulaire intra-océanique au Mexique central: la séquence volcano-plutonique de Guanajuato (Crétacé inférieur)*, C.R. Acad. Sci. Paris, t. 310, Série II, p. 45.

⁴ Freyrier, C., Lapierre, H., Ruiz, J., Tardy, M., Martínez-R., J., Coulone, C. (2000) *The Early Cretaceous Arperos basin: an oceanic domain dividing the Guerrero arc from nuclear Mexico evidenced by the geochemistry of the lavas and sediments*, Journal of South American Earth Sciences 13, p. 325.

Se debe mencionar también la presencia de la Caliza La Perlita del Albiano⁵ que descansa discordantemente sobre los materiales volcanosedimentarios de la Formación Arperos.

El conjunto superior, volcánico-clástico, cenozoico, de naturaleza continental, incluye depósitos de lechos rojos del Paleoceno-Eoceno (Conglomerado Duarte), ignimbritas riolíticas del Oligoceno (Ignimbrita Cuatralba) y materiales clásticos (Gravas El Capulín) y basáltico-andesíticos (Basaltos El Cubilete) del Neógeno. Hacia la parte suroriental de la Sierra, en el DMG, la cubierta cenozoica es muy particular.

En efecto, la secuencia cenozoica establecida desde hace tiempo para este Distrito incluye, de la más antigua a la más joven: Conglomerado Guanajuato, del Eoceno y, del Oligoceno, las unidades volcánicas Formación Losero, Formación Bufa, (Riolita Bufa, Ignimbrita Bufa), Formación Calderones (Conglomerado Calderones, Ignimbrita Calderones), Formación El Cedro (Andesita El Cedro), Formación Chichíndaro (Riolita Chichíndaro) e Intrusivo Peregrina. Las dos últimas no se presentan en el área de estudio (Figura II.2).

Desde el punto de vista tectónico estructural, en la Sierra de Guanajuato aparecen diversas deformaciones de diferentes tipos; dos son las más relevantes: de tipo compresivo y de tipo distensivo.

La primera, de tipo compresivo, afectó al conjunto basal, originando estructuras de cizallamientos subhorizontales a los que se asocian zonas de intensos microplegamientos en los materiales volcanosedimentarios. Es la responsable de la aloctonía del Arco Guanajuato sobre la cuenca de Arperos. Debe resaltarse aquí que la secuencia volcanosedimentaria de la Formación Arperos presenta un ligero grado de metamorfismo regional de facies esquistos verdes y que la Caliza La Perlita, discordante sobre ella, no manifiesta ese metamorfismo ni deformación importante.

⁵ Chiodi, M., Monod, O., Busnardo, R., Gaspard, D., Sánchez, A., Yta, M. (1988) *Une discordance ante-albienne datée par une faune d'ammonites et de brachiopodes de type téthysien au Mexique central*, Geobios, v. 21, pp. 125-135.

De lo anterior se puede deducir que la deformación importante es cretácica, antes del depósito transgresivo de la Caliza La Perlita.

En la literatura geológica de la región se reporta que la responsable de la deformación de las rocas mesozoicas es la Orogenia Larámide del Cretácico Superior-Paleoceno.

La deformación de tipo distensivo se manifestó durante el Cenozoico a través de sistemas de fallamiento normal; su edad es difícil de establecer con precisión. Entre las fallas relevantes están el sistema de fallas del Bajío que originó la exposición del basamento mesozoico de la Sierra de Guanajuato y la falla de Veta Madre que propició la mineralización de la misma.

La mineralización de la Sierra de Guanajuato, principalmente la de tipo hidrotermal alojada en vetas es abundante. Dentro del sistema de vetas del DMG se localizan también los de La Luz.

II. 2.- Estratigrafía

En el área de estudio, entre la comunidad de Santa Ana al NW y el mineral de Peñafiel al SE afloran tanto formaciones mesozoicas como cenozoicas (*Carta Geológica*, anexa). Las primeras pertenecen al basamento de la Sierra de Guanajuato, mientras que las segundas corresponden a la estratigrafía paleógena del DMG, la cual, como se ha mencionado antes, es muy particular (Figura II.2). Estratigráficamente estos dos conjuntos de formaciones están separados por una gran discordancia angular.

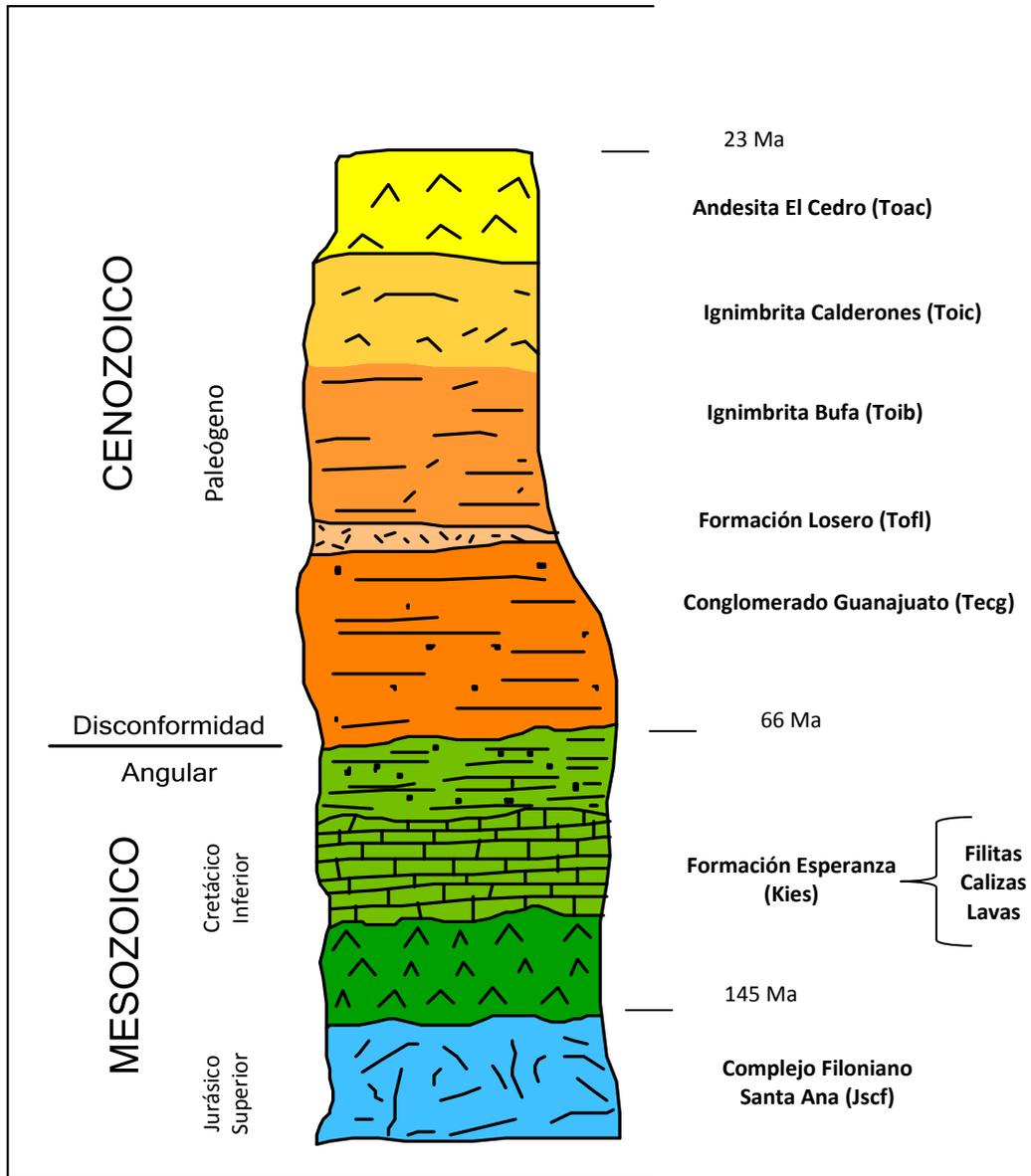


Figura II.2 Columna estratigráfica de la Zona de Estudio.

II.2.1 El Mesozoico

La litología mesozoica de la zona de estudio está constituida únicamente por dos formaciones: el **Complejo Filoniano Santa Ana** y la **Formación Esperanza**.

Estas corresponden a dos entidades paleogeográficas distintas: el primero, como ya se mencionó, se ha interpretado como parte del arco insular, el Arco Guanajuato, mientras que la segunda, como los materiales depositados en una cuenca marina de naturaleza oceánica o como los materiales de un abanico marino, el Abanico de San Luis.⁶

II.2.1.1 Complejo Filoniano Santa Ana (Jscf)

Esta unidad fue reconocida con este nombre por Monod et al. (1990) la cual aflora ampliamente a lo largo del cauce del Arroyo Santa Ana, en las inmediaciones del área de estudio.⁷ De esta misma región, Ortiz-Hernández, et al. (1992) hacen una descripción detallada de los diversos términos volcano-plutónicos que constituyen dicha unidad.⁸

A este complejo se han referido algunos autores como Diorita La Palma (Martínez-Reyes, 1992) o como Diorita La Luz (Echegoyén, et al. 1970). La primera fue considerada como una formación alóctona del Cretácico Inferior, mientras que la segunda se ubicó en el Terciario como un cuerpo intrusivo.⁹

⁶ Martini, M., Mori, L., Solari, L., and Centeno-García, E. (2011) *Sandstone provenance of the Arperos Basin (Sierra de Guanajuato, central Mexico): Late Jurassic–Early Cretaceous back-arc spreading as the foundation of the Guerrero terrane*, The Journal of Geology, v. 119, p. 597–617.

⁷ Tomado de Martínez-Reyes, J. (2000) *Geología de la Cuenca del Río Guanajuato*, Universidad de Guanajuato-Instituto de Geología de la UNAM, p.13.

⁸ Ortiz-Hernández, L.E., Chiodi, M. Lapierre, H., Monod, O. y Calvet, P. (1990; 1992) *El Arco Intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato- Características Petrográficas, Geoquímicas, Estructurales e Isotópicas del Complejo Filoniano y de las Lavas Basálticas asociadas; Implicaciones geodinámicas*, Revista del Instituto de Geología de la UNAM, vol. 9, núm. 2, p. 127.

⁹ Martínez-Reyes, J. (1992) *op cit.* y Echegoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, 36 p., 4 hojas de cartas geológicas.

El Complejo Filoniano Santa Ana se describe como una roca dura, formada por diferentes filones oscuros y claros que se cortan mutuamente, con espesores que van de decenas de centímetros a varios metros.¹⁰ Estos filones son de composición granófica, doletírica y basáltica.¹¹

Una de las descripciones más completas, como ya se dijo, es la de Ortiz-Hernández, et al. (1990; 1992) que reportan a esta unidad constituida por un enjambre de diques de dolerita, basalto y granófico que cortan a gabros, dioritas y plagiogranitos (en sentido amplio) de un complejo plutónico. Lo más característico de este Complejo Filoniano es el ramaleo de los diques, que se intersectan en todas direcciones (estructura *dike-in-dike*), así como la presencia de bordes de enfriamiento y su “enraizamiento” en la roca encajonante (Figura II.3). En la base aparece una franja delgada de gabros de acumulación (*cumulate gabros*) que evolucionan localmente a gabros subdoleríticos.¹²



Figura II.3 Afloramiento del Complejo Filoniano Santa Ana hacia la parte posterior de la Mina de Guadalupe, en los alrededores de la Comunidad de La Valenciana.

¹⁰ Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, p.13.

¹¹ Servicio Geológico Mexicano (1998) *Carta Geológico-Minera Guanajuato F14-C43 Guanajuato*, Secretaría de Economía.

¹² Ortiz-Hernández, L.E., et al. (1990; 1992) *op. cit.* p. 129.

Según Martínez-Reyes (2000) se trata de un complejo plutónico de diversas composiciones y texturas; se reconoce de tipo diorítico, gabroico, dolerítico y tonalítico con alteraciones en mayor o menor grado, presentándose clorita y epidota que les dan una coloración verdosa.¹³

En el área de estudio, esta unidad es la más antigua (**Jscf**, en la *Carta Geológica anexa*). Aparece sólo en una pequeña área hacia al NW, y presenta dos límites tectónicos: al Este con la Veta Madre, a partir de la cual se presenta la Formación Esperanza y al Sur con la Falla La Aldana, que delimita con el Conglomerado Guanajuato.

Esta zona es compleja, y difícilmente se pueden encontrar los contactos ya que la mancha urbana de la comunidad de La Valenciana se ha extendido mucho, sin embargo, se pudo localizar un punto de contacto litológico entre el Complejo Filoniano y el Conglomerado Guanajuato (Figura II.4) y rocas andesíticas, de color verde, intercaladas con el Conglomerado Guanajuato (Figura II.5); estas rocas andesíticas fueron cartografiadas por Echevoyén et al. (1970) como “Diorita La Luz”.

El Complejo Filoniano Santa Ana tiene edades que van del Jurásico Superior al Cretácico Inferior según los estudios en diorita (143 ± 9.6 Ma) y en plagiogranitos (157.1 ± 8.8 Ma) realizados por el método K/Ar en roca entera del complejo plutónico.¹⁴

¹³ Martínez-Reyes, J. (2000) *Geología de la Cuenca del Río Guanajuato*, Universidad de Guanajuato-Instituto de Geología de la UNAM, p. 13.

¹⁴ *Ídem*.

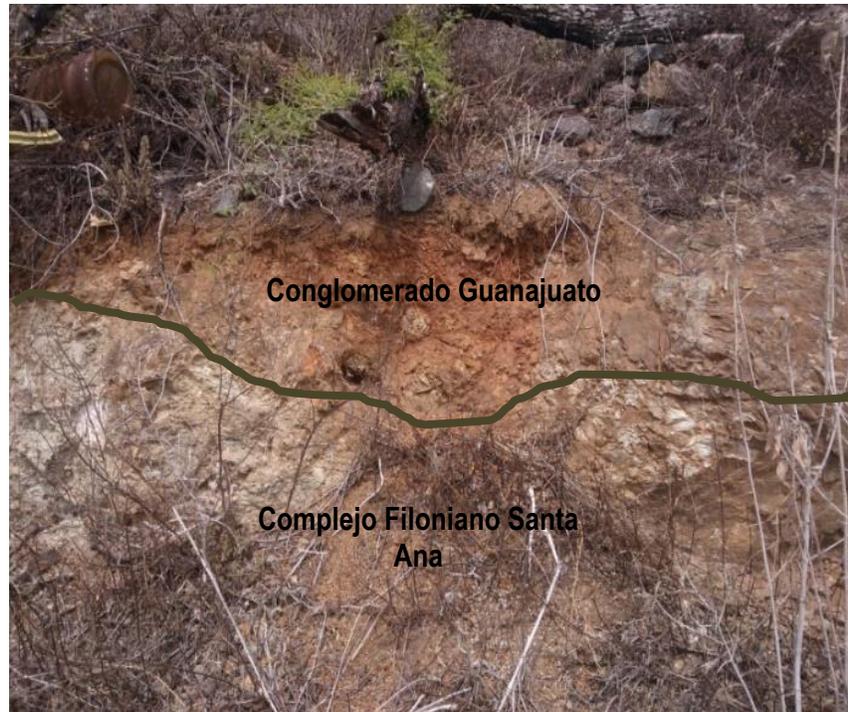


Figura II.4 Contacto litológico Complejo Filoniano Santa Ana-Conglomerado Guanajuato. Localizado en el área aledaña al Patio de la Mina La Valenciana.

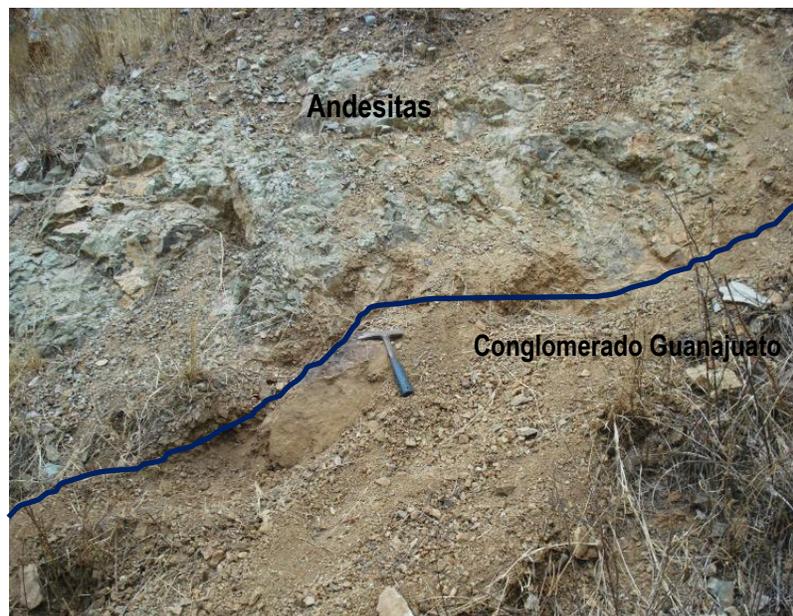


Figura II.5 Contacto de Andesitas y Conglomerado Guanajuato. Carretera Guanajuato-La Valenciana, en el tramo CEDAJ II, parte posterior de la Mina Tepeyac.

II.2.1.2 Formación Esperanza (Kies)

Esta unidad ha sido objeto de múltiples estudios. Su denominación fue asignada por primera vez por Echevoyén et al., en 1970 por su cercanía con la Presa La Esperanza al Norte de Guanajuato, para describir a un grupo de rocas sedimentarias de origen marino de edad Mesozoica;¹⁵ Martínez-Reyes (1992) la incluye dentro de la unidad de rocas vulcano-sedimentarias del Mesozoico.¹⁶ Martini et al (2011), en Aranda-Gómez, et al. (2012) la divide en las Formaciones Esperanza y Valenciana;¹⁷ Mengelle-López et al. (2013) la designa como Unidad Esperanza¹⁸ y en la tesis de Campos Medina y Milanés Luna (2014) se le llama Grupo Esperanza el cual es dividido también en las Formaciones Esperanza y Valenciana.¹⁹

La descripción de Echevoyén et al. (1970) de la Formación Esperanza corresponde a lutitas, areniscas y calizas depositadas en condiciones marinas y rocas metamórficas que se formaron a partir de las anteriores; el metamorfismo fue provocado por movimientos orogénicos y cuerpos intrusivos. Su espesor no se conoce ya que su base no aflora, sin embargo, por las obras mineras se estima de más de 500 m.²⁰ Ya Orozco (1921) y Antúnez (1964) habían realizado una descripción de este grupo de rocas, mencionándolas como “*las Pizarras del Distrito Minero de Guanajuato*”, de color negro, brillante, untuosas al tacto y físis (por lo que se les conocía como “*pizarra, hoja de libro*”), con metamorfismo de contacto producido por rocas ígneas intrusivas y plegamiento con dirección preferente al W; algunas presentando sericitación.

¹⁵ Echevoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, pp. 5-6.

¹⁶ Martínez-Reyes, J. (1992) *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato*, en Instituto de Geología (editor) Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra de Guanajuato, 40, 50-9.

¹⁷ Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris, P., Vassallo-Morales, L.F., Godchaux, M., Bonnischsen, B., Martínez-Reyes, J., Ortega-Rivera, M.A. (2012) *Geology and tectonics of the southeastern portion of the Sierra de Guanajuato*, The Geological Society of America, Field Guide 25, p. 138.

¹⁸ Mengelle-López, J.J., Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Camprubí, A. (2013) *Secuencia vulcano-sedimentaria La Esperanza (Cretácico Inferior) al norte de Guanajuato, México: Importancia en la exploración de sulfuros masivos vulcanogénicos*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 65, núm. 3, p. 512.

¹⁹ Campos Medina, Juan P. y Milanés Luna, Miriam E. (2014) *Cinemática del cabalgamiento y ventana tectónica de Santa Ana, Sierra de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, p. 13.

²⁰ Echevoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, p. 6.

Antúnez (1964) reporta estas rocas en el bajo de la Veta Madre, desde la Mina de Sirena hacia el NW y hasta el NE del Mineral de Santa Ana, y desde Peñafiel, a partir de la Veta Madre, siguiendo el camino hacia el Monte de San Nicolás y al bajo de la Veta de El Monte, hasta extenderse hacia el poblado de Santa Rosa.²¹

Una de las descripciones más recientes de la Formación Esperanza se reporta en Mengelle-López et al. (2013) donde incluye la mayoría de los autores que la han estudiado, presentando una columna estratigráfica de esta unidad (Figura II.6). Consiste en series de lutitas negras a grises y localmente pizarras, en capas delgadas, con horizontes intercalados de areniscas, conglomerados oligométicos y calizas arcillosas localmente marmorizadas, silicificadas y con clorita (Echegoyén, 1978; Martínez-Reyes, 1987; Quintero-Legorreta, 1992). Ortiz-Hernández *et al.* (1992) la describieron compuesta de brechas con clastos de dacita-riodacita, areniscas volcanodetríticas con fragmentos subangulosos de ignimbritas riodacíticas, areniscas, limolitas, pedernal negro, y calizas micríticas. Hacia su cima, la Formación presenta un paquete de turbiditas piroclásticas, interdigitado con limolitas, areniscas, radiolaritas, calizas arcillosas y calcarenitas, constituyendo una estructura tipo *flysch* (Corona-Chávez, 1988).²²

Finalmente, Campos Medina y Milanés Luna (2014) la designan como Grupo Esperanza, dividida en las Formaciones Esperanza y Valenciana. La *Formación Esperanza* (miembro inferior) está compuesta por intercalaciones de arenisca, limonitas, arcilla y algunos estratos de conglomerado. Sus estructuras sedimentarias no se observan por la intensa deformación a nivel local y por la presencia de facies de esquistos verdes de metamorfismo de bajo grado. Se presentan también diques félsicos que la cortan. Lo que llaman *Formación Valenciana* (miembro superior) corresponde al paquete de capas finas de caliza y pizarra micrítica con estratificación cruzada y laminación.²³

²¹ Orozco, Rafael (1921) *La Industria Minera de México. Distrito de Guanajuato*, Secretaría de Industria, Comercio y Trabajo, Secretaría de Educación Pública, p. 18 y Antúnez E., F. (1964) *Monografía Histórico-Minera sobre el Distrito de Guanajuato*, Comisión de Recursos Naturales No Renovables, Publicación 17E, p. 120.

²² En Mengelle-López, J.J., et al. (2013) *op. cit.*, p. 513.

²³ Campos Medina, Juan P. y Milanés Luna, Miriam E. (2014) *op. cit.*, pp. 13-14.

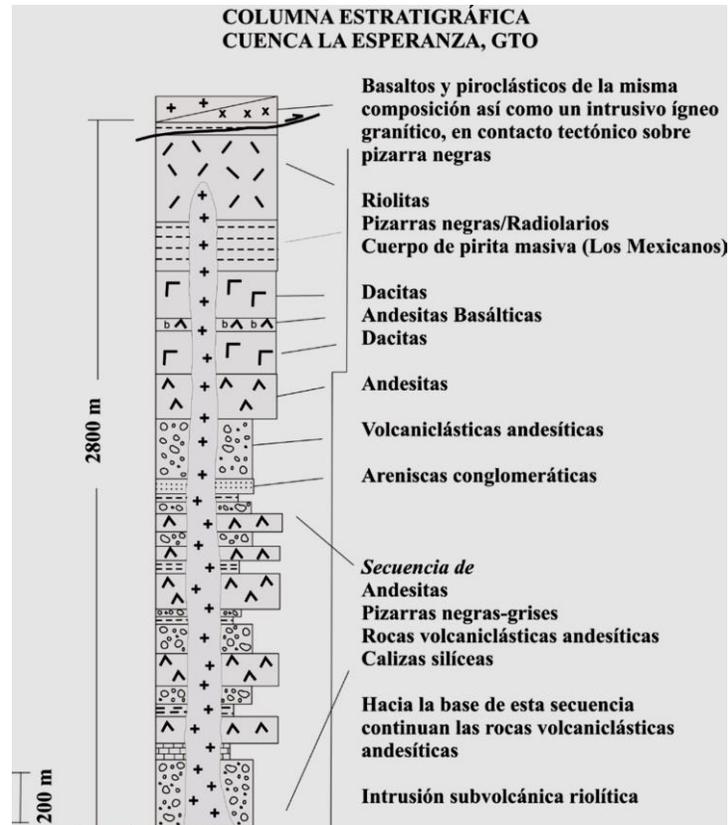


Figura II.6 Columna estratigráfica de la Formación Esperanza.²⁴

La importancia de esta formación radica en que aloja, a lo largo de la Sierra de Guanajuato, varios indicios mineralizados de tipo VMS, además de presentar extensas zonas de alteración hidrotermal (Martínez-Reyes et al., 1995). Sin embargo, aún no se ha evaluado el potencial geológico-minero de su espesor total.²⁵

La Formación Esperanza (**Kies** en la *Carta Geológica*, anexa) se presenta ampliamente distribuida en la zona de estudio y con diferentes espesores, observándose algunos afloramientos de varios metros (Figura II.7). Se extiende prácticamente en todo el cuadrante Norte-Este y hacia el SE, con una dirección aproximada NW-SE desde la presa La Esperanza hasta la zona de Peñafiel, al W de la Veta Madre.

²⁴ *Ídem*, p. 516.

²⁵ Mengelle-López, J.J., et al. (2013) *op. cit.*, p. 513.

De los estudios reportados y lo observado en campo, las facies que conforman la Formación Esperanza en la zona de estudio consisten en: asociación de *lavas andesíticas* bajo la consideración que se ubican en la parte basal, seguido de *calizas* y *lutitas* metamorfizadas a *pizarras* y *filitas*. De este conjunto, lo más evidente es la asociación de calizas y filitas.



Figura II.7 Afloramientos de la Formación Esperanza. (a) Sobre el Camino Presa La Esperanza hacia La Concepción. (b) En torno de la Bocamina San Ramón.



Figura II.8 Afloramiento de lavas andesíticas mesozoicas. Camino de acceso a la Presa La Esperanza.

Como ya se dijo, las rocas tipo *lavas* fueron cartografiadas por Echegoyén et al. (1970) como “Diorita La Luz”. Se presentan afloramientos importantes, como en el camino de acceso a la Presa La Esperanza (Figura II.8), continuando por sobre todo su lado Este (ver *Carta Geológica*, anexa) y sobre el camino de acceso a la comunidad de La Concepción (Figura II.9); ahí los afloramientos están intercalados con lutitas y calizas.



Figura II.9 Afloramiento de lavas andesíticas mesozoicas. Camino de acceso hacia la comunidad de La Concepción.

Las calizas de la Formación Esperanza se encuentran distribuidas en la zona de estudio en diferentes áreas y afloran en la parte superior de algunos cerros del Distrito, confiriendo a la superficie un notorio color blanco (Figuras II.10 y II.11).

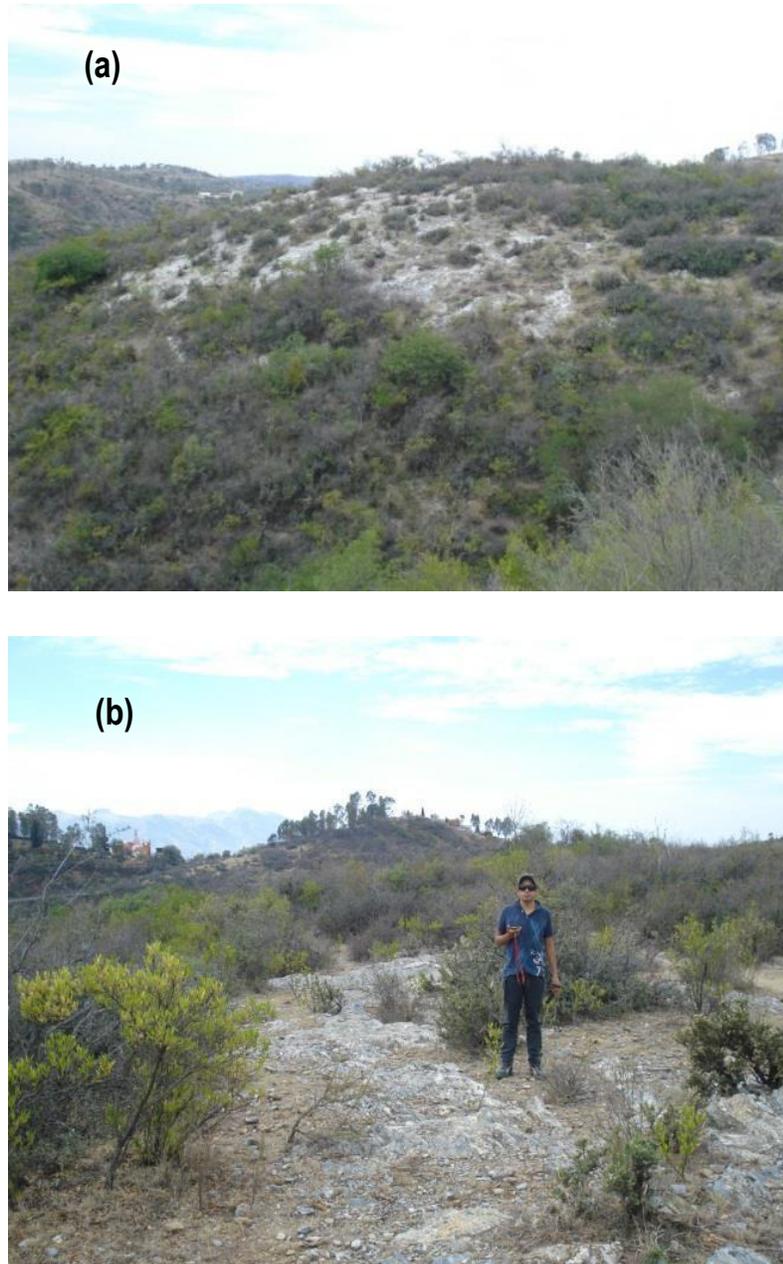


Figura II.10 Afloramiento de las Calizas de la Formación Esperanza. (a) Vista sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción. (b) Un acercamiento.



Figura II.11 Panorama desde la Carretera Guanajuato-Dolores Hidalgo hacia la ciudad de Guanajuato. En primer plano Calizas de la Formación Esperanza. Al fondo del arroyo, jales antiguos, actualmente el CEDAJ II.

Por otro lado, las rocas de la Formación Esperanza presentan una intensa foliación de lutitas con textura de metamorfismo que va de pizarras a filitas, observándose esquistosidad (Figura II.12). Otras características que se presentan en estas rocas son numerosas deformaciones, manifestado en micropliegues y basculamiento (Figura II.13) y además, se observa cuarzo de segregación (Figura II.14).

Como se verá más adelante, el plegamiento se ha reportado en dos direcciones, perpendiculares entre sí: una con rumbo NW-SE y la otra NE-SW, aproximadamente. Todas estas estructuras son el resultado de la tectónica de compresión ocurrida durante el Mesozoico y se presentan con mayor intensidad en la zona N-NE del área de estudio.



Figura II.12 (a) Rocas de la Formación Esperanza. (b) Un acercamiento de las rocas de la Formación Esperanza, mostrando esquistosidad. Ambos afloramientos sobre la carretera Guanajuato-Dolores Hidalgo, a espaldas de la Presa La Esperanza.

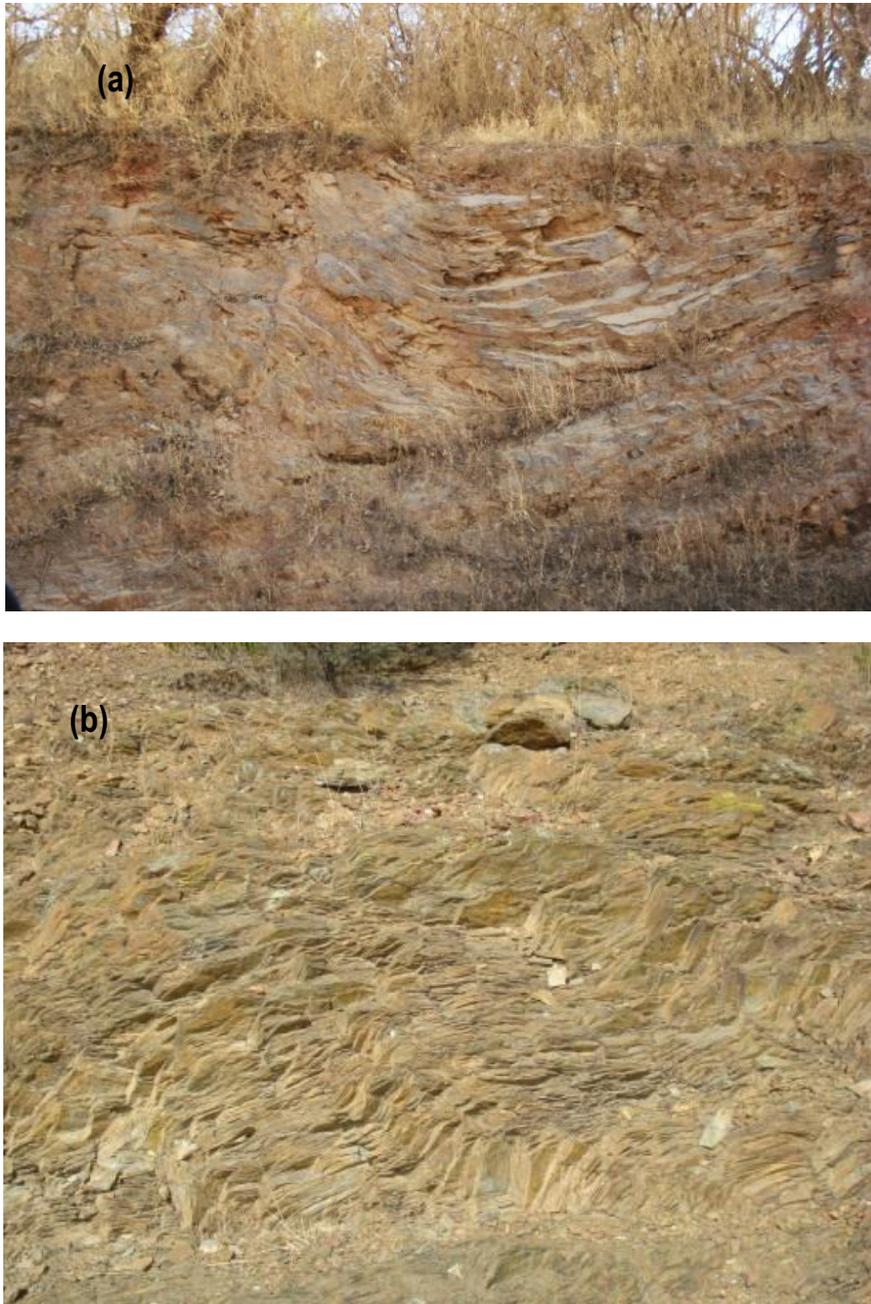


Figura II.13 Deformación de las rocas de la Formación Esperanza. (a) Plegamiento. (b) Basculamiento. Ambos afloramientos sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción.



Figura II.14 Cuarzo de segregación en las rocas de la Formación Esperanza. Afloramientos sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción.

Sobre la carretera Guanajuato-Dolores Hidalgo, a pocos metros adelante de la comunidad de La Valenciana, se presenta una zona de bloques con notoria silicificación en contacto con filitas localizado en las coordenadas UTM: 265,174E, 2 329,050N. Esto se considera una respuesta a los movimientos tectónicos producidos por el fallamiento que originó la Veta Madre, la cual se ubica a unos cuantos metros, hacia el W de este punto. Más adelante, se registra ya el Complejo Filoniano (ver *Carta Geológica*, anexa).

Respecto a la edad, Echegoyén, et al. (1970) hablan de que a finales del Triásico se depositó un grupo de lutitas que ahora se presentan metamorfozadas a pizarras, filitas y esquisto²⁶ y Nieto-Samaniego (1985) menciona una deposición de sedimentos arcillosos y calizas en cuenca marina y de emanación de rocas volcánicas submarinas, también a finales del Triásico,²⁷ lo anterior para describir los primeros eventos geológicos del DMG. Según Corona-Chávez (1988) la Formación Esperanza corresponde al Titoniano–Valanginiano (del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano), mientras que Dávila-Alcocer y Martínez-Reyes (1987) la asignaron del Valanginiano-Turoniano (del Cretácico Temprano al Cretácico Tardío) a partir de radiolarios.²⁸

II.2.2 El Cenozoico

II.2.2.1 Conglomerado Guanajuato (Teg)

Es la primera formación de la Asociación Cenozoica. Es una acumulación espectacular que cubre un área de más de 30 km² en la zona del DMG, localizándose hacia el Sur y SE de la ciudad, y donde se encuentra asentada la mayor parte de la mancha urbana de Guanajuato. Se ubica en una edad del Eoceno, aproximadamente de 49 Ma.

Es una formación que ha sido objeto de múltiples estudios y controversias en cuanto a su nombre. A lo largo del tiempo, se le ha designado como Conglomerado Guanajuato, Conglomerado Rojo de Guanajuato, Conglomerado Rojo y Formación Guanajuato.²⁹ En este trabajo se denota como Conglomerado Guanajuato.

Los primeros trabajos fueron los de Edwards (1956) y Fries et al. (1955) y lo describen como un depósito de abanico aluvial acumulado en la base de un conjunto montañoso que fue elevado rápidamente durante el Eoceno tardío al Oligoceno temprano.

²⁶ Echegoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, p. 28.

²⁷ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *Geología de un Área de 237 km² al Norte de Guanajuato, Gto.*, Tesis profesional Ingeniero Geólogo, Facultad de Minas, Universidad de Guanajuato, p. 60.

²⁸ Mengelle-López, J.J., et al. (2013) *op. cit.*, p. 513.

²⁹ Puy y Alquiza, M.J. y Miranda Avilés, R. (Coordinadores) (2012) *Patrimonio Geológico del Estado de Guanajuato*, Universidad de Guanajuato, p. 34.

Según Orozco (2014) un análisis estadístico de buzamientos de estratos indica una compleja historia de fallamiento normal y menciona que de acuerdo a Aranda y McDowell (1998), durante el Eoceno medio comenzó una extensión en el área, donde se considera se depositó lo que sería posteriormente el Conglomerado Guanajuato; esta extensión habría de continuar hasta el Oligoceno tardío.³⁰ La potencia de esta Formación se ha calculado de 1400 a 2000 m (Edwards, 1955; Buchanan, 1979).³¹

El Conglomerado Guanajuato se presenta como una secuencia de estratos de color rojo, de delgados a gruesos, de pobre a bien clasificados de limo, arenisca y conglomerados de guijarros a cantos (*boulders*). Es el producto de la erosión de las rocas mesozoicas y de la rápida acumulación de sus clastos, transportados por corriente fluviales a pequeñas cuencas continentales. Es una roca compacta, dura cuyos clastos varían de unos cuantos centímetros, hasta bloques de varios metros, poco redondeados, cementados por carbonatos de calcio y óxidos de hierro, los que le confieren su coloración rojiza. Las litologías de los clastos son de tipo volcánicas, plutónicas, sedimentarias y metamórficas.³² Cerca de zonas fracturadas se presentan alteraciones propilítica y color verde por la presencia de clorita.³³

En la estratigrafía normal, le sobreyace la Formación Losero, sin embargo, en algunas zonas el contacto es con la Formación Calderones o con la Formación, Chichíndaro, ya sea porque no hubo depósito o por erosión. Edwards (1956) reportó la presencia de estratificación gradada, estratificación cruzada, paleocanales y grietas de desecación. Los estratos varían de pobres, donde se presentan paquetes de hasta 20 m, sin planos de estratificación, a bien definidos, donde es posible tomar datos estructurales. El tamaño tan grande de los clastos, su forma angulosa y mala clasificación permite suponer un depósito en ambiente fluvial subaéreo con corrientes de alta energía, a partir de un medio de transporte de alta densidad.

³⁰ Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *Mineralogía y génesis del "clavo de Rayas" de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato*, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, UNAM, p. 23.

³¹ en Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 140.

³² Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, pp. 15-16.

³³ Mango (1992) citado por Gómez Mosqueda, Victoria (2012) *Propuesta de método de exploración para el Sistema de Vetas de La Luz*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, p. 14.

La composición de los clastos es de andesitas, basaltos, tonalitas, lutitas, calizas, riolitas, dioritas y filitas. Se observa, en lo general, que las partes más bajas presentan mayor cantidad de rocas metavolcánicas, lutitas y calizas; hacia la parte superior, predominan las rocas volcánicas ácidas.³⁴

Desde 1956, Edwards dividió al Conglomerado en los miembros inferior y superior. Los estudios más recientes reportan que el *miembro inferior* está compuesto de conglomerados polimícticos con una base erosiva intercalada con capas de arena roja y lavas andesíticas y sus clastos son de caliza, andesita, metasedimentos, diorita y piroxenos. El *miembro superior* es de conglomerados polimícticos y brechas, con clastos con mayor contenido de granito que en el miembro inferior.³⁵

Zavala Esquivel (2007) reporta que el miembro inferior presenta once litofacies, entre gravosas, areniscas y arenosas, y el miembro superior, tres litofacies, gravosas y arenosas. Esto refleja que el Conglomerado se desarrolló en un sistema de abanicos aluviales proximales progradado por sistemas fluviales de tipo trenzado. El fallamiento normal mencionado, ocurrido antes de la depositación, permitió el desarrollo de una cuenca que propició el depósito de sedimentos proximales; el miembro inferior se depositó en la fase de hundimiento de bloques seguido por el basculamiento de los mismos que originó la depositación del miembro superior.³⁶

Omaña, et al. (2015) reportan el estudio realizado a los clastos de calizas del miembro inferior del Conglomerado, donde se encontraron bioclastos con fragmentos esqueletales de bivalvos, braquiópodos, gasterópodos, equinodermos y foraminíferos. Éstos últimos indicando una edad cretácica del Berriasiano tardío al Valanginiano temprano y que permiten interpretar dos ambientes en una plataforma de agua somera: una asociación que inhabitó una zona de alta energía y otra que ocupó un ambiente de aguas tranquilas.³⁷

³⁴ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op.cit.* pp. 30-32.

³⁵ Omaña, L., Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J. (2015) *Berriasian–early Valanginian calcareous shallow-water facies from the Arperos Basin: A proposal from the foraminiferal assemblage of the clasts of the Guanajuato Conglomerate, central Mexico* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volume 67, núm. 1, p. 48.

³⁶ Zavala Esquivel, Alejandra (2007) *Análisis de facies y reconstrucción paleoambiental del Conglomerado Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, pp. 18-29.

³⁷ Omaña, L. et al. (2015), *op. cit.*, pp. 48 y 55.

En discordancia angular, como ya se dijo, el Conglomerado Guanajuato sobreyace al Complejo Filoniano y subyace a la Formación Losero. En la Figura II.15 se presenta un punto de contacto con la Formación Losero (fuera del área de estudio).



Figura II.15 Contacto estratigráfico Conglomerado Guanajuato – Formación Losero (fuera del área de estudio).

El Conglomerado Guanajuato se encuentra localizado de forma muy homogénea hacia el Centro y Sur de la zona de estudio (ver *Carta Geológica*, anexa), cuyo espesor se considera de hasta 700 m. Se presenta tanto en disposición masiva, como en estratos bien definidos (Figura II.16).

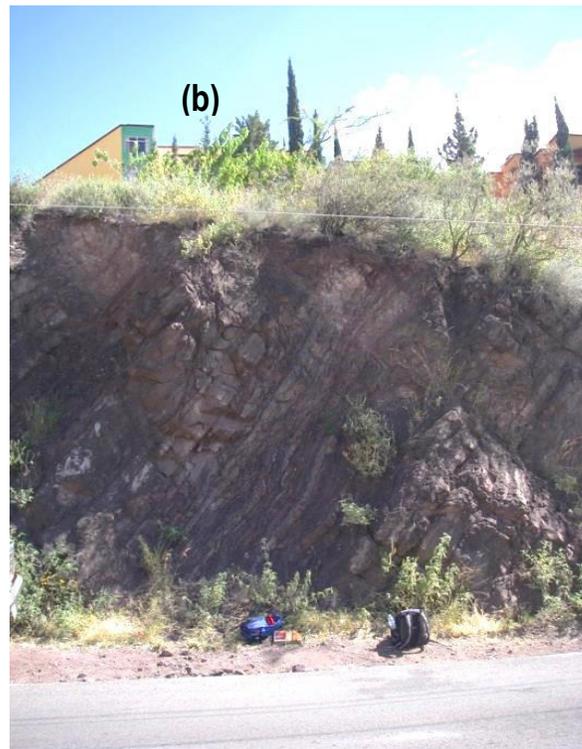


Figura II.16 Afloramientos del Conglomerado Guanajuato. (a) Estratos masivos. Sobre la Carretera Panorámica tramo San Javier-Cata. (b) Estratos medianos. Sobre la Carretera Panorámica, a la altura de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato.

En el área, el Conglomerado Guanajuato presenta contacto tectónico tanto con las rocas mesozoicas como cenozoicas, por diferentes fallas de tipo normal (ver *Carta Geológica*, anexa), las cuales son:

- (a) *Falla de La Aldana*: Complejo Filoniano y Conglomerado Guanajuato hacia el Noroeste.
- (b) *Veta Madre*: Formación Esperanza y Lavas con Conglomerado Guanajuato hacia el Este y Sureste.
- (c) *Falla Del Amparo*: Ignimbrita Bufa y Conglomerado Guanajuato hacia el Sur.
- (d) *Falla San Clemente*: Ignimbrita Calderones y Conglomerado Guanajuato; Formación Losero, Ignimbrita Bufa y Conglomerado Guanajuato, hacia el Sur.

En la zona por donde pasa la Falla de La Aldana, hacia el NW del área de estudio (ver *Carta Geológica*, anexa), se presenta un área compleja de la que ya se hizo mención, donde afloran el Complejo Filoniano, el Conglomerado Guanajuato y Andesitas intercaladas con éste (ver Figuras II.4 y II.5).

La determinación de la edad fue reportada por Fries, et al en 1955 por el estudio del cráneo de un roedor que se encontró en la parte inferior del Conglomerado, ubicándolo entre el Eoceno Medio y Oligoceno temprano.³⁸ De los estudios realizados por Gross (1975) y Randall (1984) se determina que tiene una edad que abarca todo el Eoceno.³⁹ Posteriormente, Orozco (2014) reporta que de los análisis radiométricos efectuados por Aranda-G. y McDowell (1988) en rocas de El Orito por el método K/Ar en roca total, la edad del Conglomerado es de aproximadamente 49 Ma, lo que lo ubica en el Eoceno.⁴⁰

³⁸ Echevoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, p. 9.

³⁹ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 33.

⁴⁰ Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, p. 23.

II.2.2.2 Formación Losero (Tofl)

Según Echegoyén et al. (1970), una vez que se depositó el Conglomerado inicia la actividad volcánica en la región. Esta actividad generó la *Secuencia Volcánica del Terciario*, compuesta principalmente por rocas piroclásticas originando depósitos de oleadas piroclásticas (Losero), ignimbritas masivas (Bufa) e ignimbritas estratificadas (Calderones).⁴¹ Sin embargo, lo limitado de estos afloramientos sugiere que dicha actividad no fue un fenómeno generalizado en el Distrito, sino más bien localizado al N y al E de lo que ahora es la ciudad de Guanajuato, ya que rocas semejantes y en esa posición estratigráfica sólo se encuentran en esas zonas. Este evento se deduce que ocurrió durante el Oligoceno Temprano.⁴²

La Formación Losero corresponde a la primera parte de dicha secuencia. Fue estudiada por Humboldt (1827) dándole el nombre de Lozero⁴³ y luego fue designada por algunos autores como Arenisca Bufa (Wandke, 1928 y Edwards, 1956) y Toba Loseros (Guiza et al, 1949): El nombre de Losero fue dado por Monroy en 1888 y aunque se conserva hasta ahora⁴⁴ se considera informal, ya que no indica localidad geográfica.⁴⁵

Esta formación se presenta hacia la zona Sur de la ciudad de Guanajuato. Su espesor máximo se considera hasta de 55 m, aunque en algunos lugares no se observa, ya que se encuentran las riolitas de la Formación Bufa sin Formación Losero.⁴⁶

La génesis de esta formación ha sido muy controversial, ya que algunos geólogos la han considerado de origen netamente volcánico y otros como una roca sedimentaria. Por ejemplo, Wandke y Martínez (1928) le nombraron Arenisca Bufa porque pensaron que estaba ligada genéticamente a la riolita de la Formación Bufa, que la sobreyace, y Cepeda (1956) estableció que se trata de un miembro inferior de dicha Formación debido a que la fuente de origen es el mismo.

⁴¹ Coutiño Taboada, Mariana E. (2015) *Correlación estratigráfica de las unidades del Terciario Medio del Distrito Minero de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

⁴² Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 40 y 62.

⁴³ Servicio Geológico Mexicano (2013) *Léxico Estratigráfico de México. Ficha de Unidad Litoestratigráfica (Formación)*. Formación Losero. http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html (consulta: 19 de abril de 2016).

⁴⁴ Echegoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, pp. 9 y 10.

⁴⁵ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 34 y Servicio Geológico Mexicano (2013) *op. cit.*, Formación Losero.

⁴⁶ Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, p. 16.

Por otro lado, Jaime (1984) la consideró como parte del Conglomerado Guanajuato, diferenciándose de éste por el mayor contenido de material volcánico, y propuso fueran definidas como una sola formación.⁴⁷

En la Tabla II.1 se presentan algunas de las diferentes interpretaciones litológicas que se han reportado de la Formación Losero, las cuales se han tomado como referencia para las descripciones más recientes.

Como puede observarse, la mayoría de los autores coinciden que se trata de una *arenisca de composición ácida o félsica* (riolítica), de cuarzo, feldespato, material volcánico y clorita.⁴⁸ También coinciden en que dicho material se depositó en aguas someras y tranquilas, en un sistema fluvial trenzado. El argumento en la denominación de roca sedimentaria se basa, principalmente por su buena estratificación paralela y buena clasificación de los granos, además por la presencia de estructuras sedimentarias como laminación paralela, estratificación cruzada, ondulitas, grietas de desecación, huellas, marcas de lluvia, surcos de arrastre y sismitas.

Estudios más detallados se presentan en algunas Tesis Profesionales. Por ejemplo la descripción de las facies de esta formación, realizado por Juárez Mendoza (2011), presenta que esta roca está conformada por ocho litofacies: arenisca gruesa con estratificación laminar (Sm), arenisca fina con estratificación laminar (Sh), arenisca fina masiva (Ss), arenisca gruesa masiva (Sg), arenisca de gradación normal (Sgn), arenisca de gradación inversa (Sgi); y muy escasas las litofacies arenisca con estratificación hamacada (St) y ondulitas (So).⁴⁹

⁴⁷ Para una discusión más detallada sobre la designación de esta Formación, ver en Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, pp. 34-35.

⁴⁸ Aun Echegoyén, et al., que, aunque la describen como una ceniza volcánica, su denominación original fue Arenisca Losero.

⁴⁹ Juárez Mendoza, Rogelio (2011) *Estudio de Litofacies de la Formación Losero de la ciudad de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, p. 56

Tabla II.1 Interpretación litológica y origen de la Formación Losero reportada por varios autores.

| Autor, Año | DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA | Origen y espesor |
|---------------------------|--|---|
| Echegoyén, et al. (1970) | Cenizas volcánicas de grano fino, granos angulosos ligeramente redondeados de cuarzo y feldespato, gran proporción de material volcánico silíceo, cementado por calcita. Presenta láminas delgadas continuas con buena estratificación, capas de grano uniforme, pequeños canales, diastratificación, capas delgadas con impresiones de oleaje. | Deposición de la arenisca con discordancia local sobre el conglomerado en una superficie casi plana, con ligera inclinación, en una o varias cuencas pequeñas, cerradas, de aguas someras y de relativa calma. Espesor de hasta 25 metros, después de disminuir hasta perderse hacia el SE de la ciudad. |
| Nieto- Samaniego (1985) | Areniscas tobáceas de composición riolítica con cuarzo, feldespatos, vidrio y clorita. Se le observa bien estratificada en capas delgadas de 30 cm, de color predominantemente verde, con coloraciones moradas, rojizas y blancas. El fallamiento de la zona ha basculado estas rocas, presentándose echados suaves hacia el NE de 15° a 20°, con rumbos NW10°SE a NW40°SE. | Deposición en aguas someras y tranquilas. Se le ha asignado un espesor máximo de 25 m (Echegoyén, 1970). |
| Martínez-Reyes (2000) | Arenisca tobácea, compacta, de color verde generalmente, rojizo o crema, incluye cuarzo, feldespatos, líticos y vidrio volcánico. Abundante clorita que le imprime su coloración verdosa. | El espesor puede variar de 5 a 25 metros. |
| Aranda y Vasallo (2007) | Arenisca bien clasificada, en estratos de delgados a medianos, de color rojo oscuro, a un intervalo de estratos rojos de origen sedimentario, interestratificados con láminas verdosas de oleadas piroclásticas que predominan en la parte superior. Esta variación indica un cambio transicional desde un régimen sedimentario a otro predominantemente volcánico. | Deposición en un ambiente subaéreo. Espesor entre 0 y 55 m; se le encuentra discordantemente sobre el Conglomerado. |
| Aranda G. et al. (2012) | Arenisca verde volcanoclástica muy bien clasificada de estratos delgados a medios con estructuras sedimentarias (estratificación cruzada, ondulitas, huellas, rellenos, marcas de lluvia). Originalmente se interpretó como una acumulación de arenisca epiclástica-volcánica de lagos someros o bien como depósitos de explosiones piroclásticas subaéreos acumulados y localmente retrabajados en un lago somero. La naturaleza piroclástica sugerida principalmente por el bajo ángulo de la estratificación cruzada es más pronunciada en la parte superior. | Depósito epiclástico-volcánico cubierto de agua que pasa de grano medio a fino, de arenisca bien clasificadas a capas de explosiones piroclásticas de color verde. De 0 a 50 m de espesor. |
| Puy-Alquiza, et al (2014) | Litarenitas y arcosas derivadas de un basamento granítico y metamórfico típico de un cratón interior. Estructuras primarias: rizaduras, antidunas, marcas de flutes y grooves, laminación paralela y cruzada, grietas de desecación y estructuras de deformación (sismitas). Pueden considerarse como las facies distales del Conglomerado Guanajuato. | Deposición en un margen continental activo. El análisis modal indica que se originó de un orógeno reciclado y un arco disectado. Las evidencias sedimentológicas, petrográficas y geoquímicas sugieren un origen volcánico o sedimentario y una acumulación en un ambiente fluvial en condiciones de flujo somero a profundo. Las areniscas fueron depositadas por flujos supercríticos y sub-críticos así como por flujos unidireccionales dentro de canales y barras de un sistema fluvial. |
| Puy-Alquiza, et al (2015) | Se caracterizan por presentar estructuras sedimentarias primarias como laminación paralela, grietas de desecación, ondulitas, estratificación cruzada, antidunas, marcas de flautas y surcos de arrastre. Se observan estructuras de deformación interpretadas como sismitas, que son el resultado del aumento de la presión en los poros del sedimento debido a esfuerzos horizontales y verticales inducidos por la actividad sísmica. | Depósito resultado de un sistema fluvial trenzado. |

La Formación Losero (Tofl), en su característica disposición en estratos bien definidos (Figura II.17), se presenta en el área de estudio en el Cerro de Sirena, Cerro El Meco y hacia el Mineral de Peñafiel (ver *Carta Geológica*, anexa), sobreyaciendo siempre al Conglomerado Guanajuato y debajo de la Ignimbrita Bufa, como corresponde su ubicación en la columna estratigráfica.

Por otro lado, son pocos los trabajos donde se reporta la edad de esta Formación. Antúnez Echagaray (1964) le asigna una edad de 20 millones de años⁵⁰ y por su posición estratigráfica, Nieto-Samaniego la ubica en el Oligoceno Temprano.⁵¹ En las Tesis Profesionales se reporta una edad del Eoceno Superior al Oligoceno Inferior,⁵² del Oligoceno,⁵³ y, en un estudio reciente de correlación estratigráfica de las unidades del terciario Medio del Distrito, con pruebas de U-Pb en circón se reporta una edad de 31.96 ± 0.27 Ma,⁵⁴ ubicándola en el Oligoceno Temprano.



Figura II.17 Afloramiento de la Formación Losero. Zona del Cerro de La Bufo (fuera de la zona de estudio).

⁵⁰ Antúnez Echagaray., F. (1964) *Monografía Histórico-Minera sobre el Distrito de Guanajuato*, Comisión de Recursos Naturales No Renovables, Publicación 17E, p. 123.

⁵¹ Nieto-Samaniego, A.F. 1990 (1992) *Fallamiento y Estratigrafía Cenozoicos en la parte Sudoriental de la Sierra de Guanajuato*, Revista del Inst. de Geología, UNAM, vol. 9, núm. 2, p. 149.

⁵² Juárez Mendoza, Rogelio (2011), *op. cit.*

⁵³ Martínez Alfaro, Martha D. (2013) *Caracterización del material pétreo de la Formación Losero para uso en la restauración y construcción de monumentos en la ciudad de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

⁵⁴ Coutiño Taboada, Mariana E. (2015) *op. cit.*



Figura II.18 Huellas de desecación en la Formación Losero. Zona del Cerro de La Bufa (fuera de la zona de estudio).

Aun con lo anteriormente expuesto, sin embargo, consideramos conveniente no denotar a esta roca como arenisca, ya que indicaría que se trata de una arena, siendo que el material que la forma es de origen volcánico (oleadas o explosiones piroclásticas), pudiéndose describir como una *Toba Arenosa*.⁵⁵ Además, no se reporta un transporte, sólo una depositación, durante la cual, dadas las características del ambiente en el que ocurrió, se fueron dando las características que tanto la distinguen, como es sobre todo su estratificación, así como las estructuras sedimentarias (Figura II.18).

⁵⁵ Vogel G., Federico (2016) Comunicación personal.

II.2.2.3 Ignimbrita Bufa (Toib)

Sobreyaciendo la Formación Losero y en una superficie erosional se presenta la segunda unidad de la secuencia de rocas volcánicas de edad Terciaria. Es una roca de composición riolítica, de poca extensión, localizada hacia el E y SE de la ciudad de Guanajuato y que toma el nombre, propuesto informalmente por Cepeda (1965)⁵⁶ del famoso Cerro de La Bufa.

Todavía sin designarla con un nombre formal, Antúnez (1964) describe esta formación como una toba riolítica de color rojo de composición feldespática con mica-biotita, sin mostrar lechos de estratificación y presentándose como corrientes, con estructura fluidal bien definida como erupciones en masa y como tobas y brechas.⁵⁷

Nieto-Samaniego (1985; 1990-1992) la describe como constituida por rocas de composición riolítica tanto tobas e ignimbritas como derrames piroclásticos y algunas brechas; conserva la designación de Riolita Bufa.⁵⁸

Una *ignimbrita* es una roca formada por flujos piroclásticos densos con alto contenido de fragmentos magmáticos que se emplazan a temperatura elevada. Se generan por colapsos de las columnas eruptivas en las erupciones plinianas y en el de domos y coladas lávicas de viscosidad elevada. Se desarrollan flujos laminares para unidades de mayor densidad y turbulentos en los niveles superiores por nube acompañante, diferenciando las unidades en el depósito. Con base en la temperatura de detención, existen ignimbritas soldadas o no soldadas y la potencia del depósito y área ocupada determina los dos tipos principales: las tipo HARI que son muy potentes, tienen poca extensión superficial y se adaptan a la topografía emplazándose en zonas deprimidas y las tipo LARI, que son corrientes de muy alta energía, ocupan una gran extensión superficial y no están condicionadas en su emplazamiento por la topografía, pudiendo remontar crestas de centenares de metros de altura.⁵⁹

⁵⁶ En Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 35.

⁵⁷ Antúnez Echagaray, F. (1964), *op. cit.*, pp. 123-124.

⁵⁸ En Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, pp. 36-37 y Nieto-Samaniego, A.F. 1990(1992) *op. cit.*, p. 149.

⁵⁹ <http://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/ig.htm> (consulta el 29 de marzo de 2016).

El hecho de que se reconozcan las características descritas de la ignimbrita⁶⁰ en la Riolita Bufa es por lo que a esta formación se le ha designado en este trabajo como Ignimbrita Bufa. Esta formación está constituida por tobas volcánicas (flujo de ceniza) de más de 350 m de espesor, masivas, de color rosa cuando están sanas pero blanquecinas al caolinizarse. Presentan menos del 25% de fenocristales de cuarzo, sanidina y algo de plagioclasa y biotita en una matriz vítrea. También existen clastos líticos de andesita y/o riolita y fragmentos del Conglomerado Guanajuato.

En la zona Sureste del Distrito la ignimbrita presenta disposición columnar, formando acantilados prominentes con juntas muy verticales, lo cual está relacionado a compactación y/o silicificación. En algunos lugares esta compactación es más pobre pero la silicificación la hace una roca endurecida.⁶¹ Se considera se originó a partir de un colapso o subsidencia por la presencia de dos fallas que formaron un patrón en “X”, o bien, por una fisura por debajo de esas fallas que sirvió como zona de alimentación.⁶²

En la zona de estudio, la Ignimbrita Bufa (así como la Ignimbrita Calderones) se encuentra conformando parte de los Cerros de Sirena y El Meco, extendiéndose al S-SE del área (ver *Carta Geológica*, anexa), en la zona del Mineral de Peñafiel y hacia la comunidad de Calderones. La primera sobreyace a la Formación Losero y subyace a la Ignimbrita Calderones (Figura II.19), ésta sobreyace a la Ignimbrita Bufa y subyace a la Andesita Cedro.

⁶⁰ En ocasiones este término se utiliza en *sentido litológico*, para referirse a tobas soldadas, en otras se ha utilizado en un *sentido genético*, refiriéndose a depósitos del tipo flujo piroclástico. La definición de Cas y Wright (1992) es: *roca o depósito formado a partir de un flujo piroclástico pumítico, independientemente de si está soldado o no*. Los fragmentos pueden ser de tamaño muy variados, con pómez y otras rocas flotando en una matriz de ceniza. En: Oyarzun, R. *Algunas definiciones útiles de campo respecto a tipos de rocas piroclásticas y depósitos relacionados*. www.aulados.net/Geologia_yacimientos/Rocas.../Rocas_Piroclasticas.pdf (fecha de consulta: 14 de abril de 2016).

⁶¹ Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, p.16 y Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 141, 142.

⁶² Labarthe, et al. (1995, 1996), citado en Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, p. 26.



Figura II.19 Afloramiento de la Ignimbrita Bufa. Camino Pastita –Mineral de Peñafiel.

La edad de esta formación se reporta de 37.0 ± 3.0 Ma por Gross (1975) utilizando el método de K-Ar ⁶³, Aranda-Gómez, et al (2012) la ubica entre 33.8 – 33.0 Ma con el método de U-Pb en circón y en 34.0 – 33.0 Ma con Ar-Ar en sanidina⁶⁴ y Coutiño (2015) determina con U-Pb en circón entre 33.57 ± 0.22 y 33.0 ± 0.3 Ma.⁶⁵ Las últimas determinaciones ubican a la Ignimbrita en el Oligoceno Temprano.

⁶³ *Ídem.*

⁶⁴ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 141.

⁶⁵ Coutiño Taboada, Mariana E. (2015) *op. cit.*,

II.2.2.4 Ignimbrita Calderones (Toic)

La tercera formación de la Secuencia Volcánica Terciaria es una roca ignimbrítica estratificada. Wandke y Martínez (1928) la presentan como las brechas y flujos andesíticos ubicados sobre la riolita. Antúnez (1964) se refiere a esta unidad como *Andesita de Calderones* y la describe como una serie de bancos de tobas y brechas de color gris verdoso, muy extensa y de espesor considerable.⁶⁶ Meave (1956) la designa como Formación Calderones por la comunidad de ese nombre al SE de la ciudad de Guanajuato, nombre tomado por Echevoyén, et al. (1970) quienes reporta que esta roca descansa sobre una superficie erosionada de la Ignimbrita Bufa; distingue tres miembros: uno inferior de capas de areniscas de grano fino y lentes de conglomerado, otro medio de tobas masivas separadas del inferior por una superficie de erosión y un miembro superior formado por areniscas tobáceas de grano grueso que pasan a brechas y tobas masivas o en capas gruesas.⁶⁷ Estas primeras caracterizaciones de la roca permitieron que en ocasiones se le designara como Formación Calderones y en otras, Conglomerado Calderones.⁶⁸

La potencia de esta formación se reporta entre 200 y 250 m de una sucesión de estratos gruesos (conglomeráticos) y delgados (arenosos), compactos, que descansan sobre la Ignimbrita Bufa que la subyace o directamente sobre el Conglomerado Guanajuato.⁶⁹

Un estudio más detallado se presenta en Aranda-Gómez et al. (2012), donde se describe a esta roca formada por ignimbritas de composición andesítica a dacítica localmente interestratificadas con estratos volcano-epiclásticos acumulados en un lago somero. Se acumula sobre una superficie erosional desarrollada sobre la Formación Bufa (Ignimbrita Bufa). Su naturaleza es clástica, en capas, de color claro a verde oscuro por cloritización. Comúnmente presenta paleocanales someros, especialmente en posición proximal y media. Existen lugares donde un 75% del depósito son fragmentos líticos angulares, afaníticos a porfídicos de andesita cloritizada, probablemente derivados del complejo basal, y en otros, los fragmentos líticos de rocas metasedimentarias en el basamento son más abundantes.

⁶⁶ Antúnez Echagaray., F. (1964) *op. cit.*, p. 124.

⁶⁷ Echevoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, pp. 12-13.

⁶⁸ Nieto-Samaniego, A.F. 1990(1992) *op. cit.*, p. 149.

⁶⁹ Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, p.17.

Los estratos de esta formación van de medio a grueso; el tamaño de grano de los clastos de arena fina a cantos; son comunes los guijarros y gránulos. En algunos lugares se presentan estratos finos y laminación fina o bien, tobas de flujos de ceniza de finos (3 a 5 m) a medio (más de 20-30 m). En otros lugares su base es una toba de flujo de cenizas rica en líticos con clastos grandes de dacita (más de 1 m de diámetro), en una matriz vitroclástica donde los trozos de vidrio son alterados a clorita.⁷⁰ Estos autores también reportan una columna estratigráfica de las diferentes facies que presenta esta formación (Figura II.20).

En el área de estudio, la Ignimbrita Calderones se observa hacia la zona Sur sobreyaciendo a la Ignimbrita Bufa. Constituye la parte superior de los Cerros Sirena y El Meco y se presenta en un área más o menos extendida en las zonas contiguas a Peñafiel, donde es intersectada por las Fallas de la Veta Madre, Del Amparo y San Clemente (ver *Carta Geológica*, anexa), las cuales hacen que se presenten tendencias litoestratigráficas interesantes, que se comentarán más adelante.

A la Ignimbrita Calderones se le asigna una edad del Oligoceno por ser posterior a la Ignimbrita Bufa (de 37.0 ± 3.0 Ma) y anterior a la Andesita Cedro (de 32.9 ± 1.6 Ma).⁷¹ Aranda-Gómez, et al (2012) y Coutiño (2015) en pruebas de U-Pb en circón le asignan una edad del Oligoceno Temprano: entre 32.9 y 31.0 Ma y 32.54 ± 0.56 y 33.22 ± 0.46 , respectivamente.⁷²

⁷⁰ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 142.

⁷¹ Nieto-Samaniego, A.F. 1990(1992) *op. cit.*, p. 149 y Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, p. 27.

⁷² Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 141 y 142 y Coutiño Taboada, Mariana E. (2015) *op. cit.*

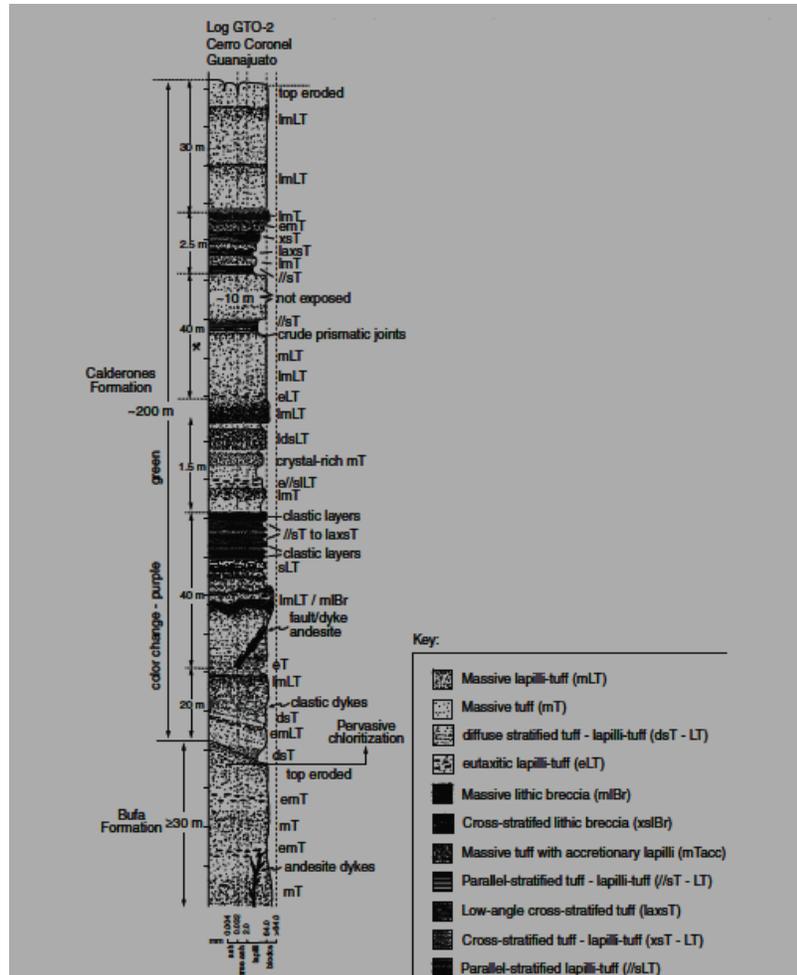


Figura II.20 Columna estratigráfica de la Ignimbrita Calderones.⁷³

Un aspecto muy interesante de las formaciones cenozoicas, geológicamente hablando, es su relación con las diferentes estructuras (fallas normales) de la zona, sobre todo con la Veta Madre, que pone en contacto estas formaciones con las del Mesozoico: en la zona del Cerro de Sirena, el Conglomerado Guanajuato y las Ignimbritas Bufa y Calderones con la Formación Esperanza, sobre todo las rocas de Bufa.

⁷³ Registro estratigráfico de una sección intermedia a distal de la Formación Calderones expuesta en el cerro El Coronel; sin escala; espesores estimados. Las abreviaciones de las claves usadas para describir las litofacies se modificaron de Branney and Kokelaar (2002). En Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 156-157.

Siguiendo su trayectoria hacia el Sur (ver *Carta Geológica*, anexa), hacia la zona de Peñafiel, la Veta Madre se intersecta con las Fallas Del Amparo y San Clemente, hacia el Este y con las Fallas Las Escobas y Chichíndaro, hacia el Oeste; estas dos últimas fallas pudieran ser la Del Amparo y San Clemente, pero desplazadas.

Este conjunto de fallas afecta las rocas de esta zona y permite observar al Este de la Veta Madre y entre las Fallas Las Escobas y Chichíndaro, un bloque de formaciones cenozoicas, integrado por el Conglomerado Guanajuato, en contacto con la Formación Esperanza y con la Ignimbrita Calderones, además de la Formación Losero, la Ignimbrita Calderones y el único afloramiento de la Andesita El Cedro de la zona de estudio. Se observa también que la Falla Las Escobas pone en contacto tectónico no sólo a la Formación Esperanza con el Conglomerado Guanajuato, sino también con la Ignimbrita Calderones.

Además, la Falla Chichíndaro, desplaza la Ignimbrita Calderones y la pone en contacto con el Conglomerado Guanajuato, la Ignimbrita Bufo y la Formación Losero.

Sobre la cañada del lado Este del Cerro de El Meco se observó una zona de alteración hidrotermal producida por un fallamiento con aparente mineralización, encontrándose vetilleo y rocas con textura brechoide de cuarzo, pirita y probablemente calcita y feldespatos (Figura II.21).

Tanto en la zona Sur de este fallamiento (en las faldas del Cerro de El Meco) como en su zona Norte, se observa un desplazamiento de la Formación Losero. Además, en la trayectoria de esta falla de Sur a Norte, pasa primero por la Ignimbrita Bufo sin desplazarla, pero en su zona Norte, al intersectarse con las Fallas San Clemente y La Aldana, en ese orden, se presenta el Conglomerado Guanajuato sobre la Ignimbrita Bufo (no se presenta la Formación Losero) y en contacto con la Formación Losero (Figura II.23 y *Carta Geologica*, anexa).



Figura II.21 Vetilleo sobre rocas de Ignimbrita Bufo. Localizado sobre la ladera este del Cerro El Meco.

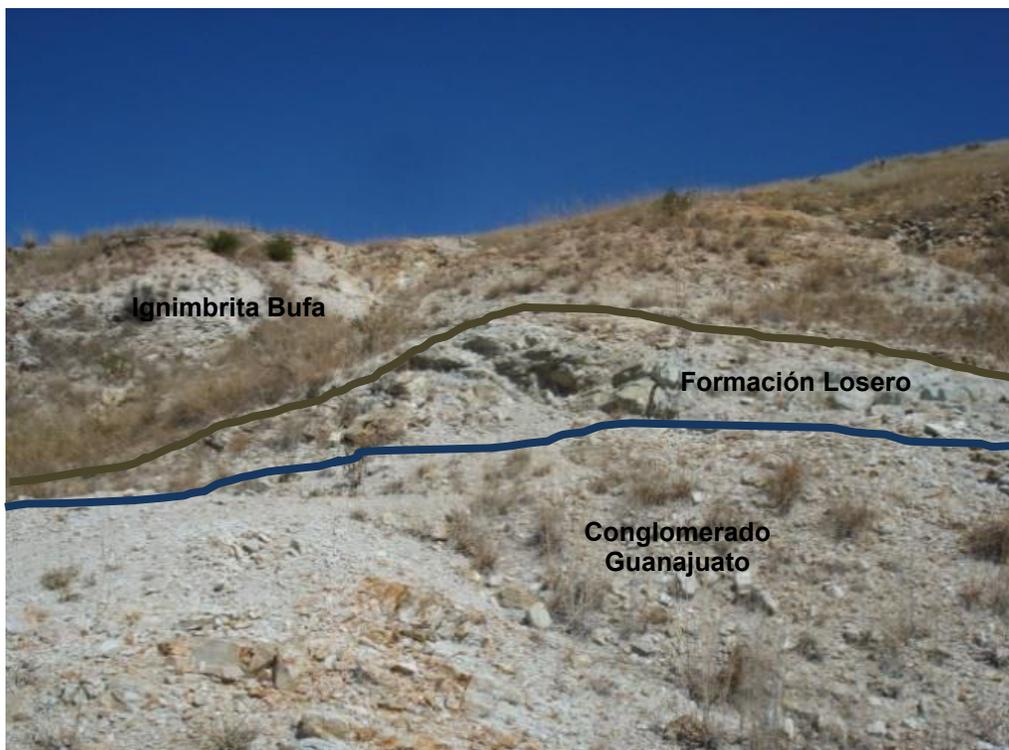


Figura II.22 Zona de contacto entre las formaciones Conglomerado Guanajuato-Ignimbrita Bufo-Formación Losero. Localizada en la parte superior del Cerro de El Meco, hacia su ladera Este.

II.2.2.5 Andesita El Cedro (Toac)

Es la cuarta formación de la Secuencia Volcánica Terciaria, la única roca oscura; presenta textura porfídica. Wandke y Martínez (1928) la ubicaron como parte de la Ignimbrita Calderones hasta que Guiza (1949) la estudia como una unidad separada.⁷⁴ Antúnez (1964) la nombra “*Andesitas y andesitas de hiperstena*”, de carácter efusivo y con un espesor máximo de cerca de 400 m.⁷⁵ Guiza (1949) y Meave (1959) le dieron el nombre de Formación Cedro por la comunidad de El Cedro, donde fue estudiada por primera vez.⁷⁶

Se trata de una formación de poca extensión formada por espesos derrames de lavas de color oscuro, de composición andesítica y basáltica, que por intemperización se alteran a color café o tonalidades blanquecinas; en algunos lugares se presenta interestratificada con tobas. Presenta textura porfídica compuesta de fenocristales de plagioclasas (andesina), minerales máficos (olivino, augita, hornblenda e hiperstena) en una matriz criptocrystalina de plagioclasa y minerales máficos.⁷⁷ Orozco (2014) reporta que en los trabajos de Labarthe et al. (1995,1996), según el análisis químico y la relación K_2O/SiO_2 , esta roca es una traquiandesita muy rica en potasio.⁷⁸

El espesor reportado es variable: de hasta 640 m (Echegoyén, 1970), 250 m (Gross, 1975), entre 250 y 640 m (Randall, 1994), no más de 150 m (Labarthe, et al. 1995, 1996), de 200 a 250 m (Martínez-Reyes, 2000), entre 100 m y 640 m (Aranda G.-Vasallo, 2007) y entre 250 y 640 m (Aranda-Gómez, et al., 2012).

Esta formación solamente se presenta en un área muy pequeña al S-SE de la Carta, sobreyaciendo a la Ignimbrita Calderones, en la cima del cerro frente al Mineral de Peñafiel (ver *Carta Geológica*, anexa).

⁷⁴ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 41.

⁷⁵ Antúnez Echagaray., F. (1964) *op. cit.*, p. 124.

⁷⁶ Echegoyén S., J., et al. (1970) *op. cit.*, p. 14.

⁷⁷ Martínez-Reyes, J. (2000) *op. cit.*, p.17., Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 41., Aranda-Gómez, J.J., et al (2012) *op. cit.*, p.142. Nieto-Samaniego, A.F. 1990(1992) *op. cit.*, p. 149.

⁷⁸ Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, p. 27.

Por su posición estratigráfica, esta Formación queda comprendida en una edad del Oligoceno. Labarthe, et al. (1995, 1996) determina de $32.9 \pm 1.6 \text{ Ma}^{79}$ y Aranda-G., et al. (2012) por análisis de U-Pb en circón, la reporta de 32.7-33.6 Ma.⁸⁰

II.3.- Estructuras

La zona de estudio sigue la estructura de la Sierra de Guanajuato, la cual está dominada por una orientación NW-SE y a su vez, manifiesta los efectos de la tectónica que se ha ido presentando a lo largo de la evolución geológica, como son la esquistosidad en rocas metamórficas de bajo grado, la orientación de los planos axiales de los pliegues en el Complejo Basal, en nuestro caso, en la Asociación Mesozoica Vulcano-Sedimentaria y en el rumbo de algunas fallas del Cenozoico, las cuales se reportan de tipo normal.

En general, las estructuras de la zona se pueden dividir en dos grupos: las de edad *Mesozoica*, correspondientes a pliegues, foliación, deformación milonítica, cizallamiento y cabalgaduras, producto de esfuerzos COMPRESIVOS y las de edad *Cenozoica*, manifestadas en fallas normales y fracturas, provocadas por esfuerzos TENSIONALES, además de basculamiento. (Figura II.23)

II.3.1 Estructuras Mesozoicas

Los esfuerzos compresivos producidos en el Mesozoico, reportados del Cretácico Medio se han atribuido a la deformación causada por la Orogenia Larámide, ocurrida entre el Cretácico Superior y el Terciario Inferior (Paleoceno; 65-60 Ma) y que provocaron la foliación con orientación NW de los planos axiales de los pliegues.⁸¹

⁷⁹ Citado por Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, p. 27.

⁸⁰ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 141

⁸¹ Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris, P., Vassallo-Morales, L.F., Godchaux, M., Bonnischsen, B., Martínez-Reyes, J., Ortega-Rivera, M.A. (2012) *Geology and tectonics of the southeastern portion of the Sierra de Guanajuato*, The Geological Society of America, Field Guide 25, p. 144..

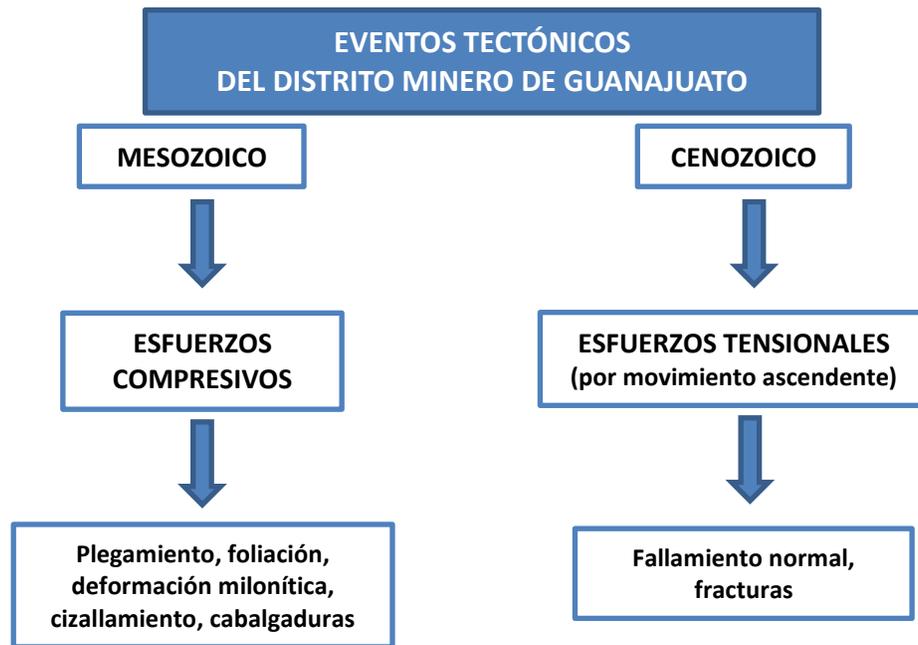


Figura II.23. Principales eventos tectónicos en el Distrito Minero de Guanajuato.

Ortiz-Hernández (1990; 1992) y Álvarez Maya (1997) reportaron dos fases de deformación compresiva, la primera dentro de la *Orogenia Oregoniana* del Albiano (Cretácico Temprano) que originó plegamiento de tipo isoclinal, generando planos de esquistosidad, subparalelos a los planos de estratificación de la Secuencia Mesozoica y la segunda dentro de la *Orogenia Larámide*, en la que se produjo una segunda esquistosidad o foliación, con ejes mostrando varias direcciones de esfuerzos compresivos. Además, el Basamento Mesozoico fue afectado por la distensión del Cenozoico produciéndose fallamiento normal con estructuras con orientación principal NW-SE y desplazamiento lateral izquierdo.⁸²

⁸² Ortiz-Hernández, L.E., et al. (1990; 1992) *op. cit.*, p. 126 y Álvarez-Maya, V.M. (1997) *Comportamiento de la Veta Madre en el Basamento Mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato* Trabajo de Diplomado en Especialista en Geología Económica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí, pp. 28-29.

Martini et al. (Fitz et al. 2011) interpretan tres pulsos de deformación: el primero produjo zonas de cizalla y plegamiento isoclinal volcados al SW, el segundo formó estructuras con tendencia al SE y el tercero produjo pliegues cilíndricos, simétricos y verticales sobre las primeras estructuras. Los dos primeros son atribuidos al cierre de la cuenca de Arperos y la acreción del Terreno Guerrero; el tercero al empuje y plegamiento por la Orogenia Larámide.⁸³

Como ya se dijo, estos eventos de compresión son registrados en la zona de estudio principalmente en las rocas mesozoicas de la Formación Esperanza, en las que se observa una intensa foliación de lutitas, metamorfizadas a pizarras y filitas, presentándose en algunas zonas esquistosidad y sericitación. También se registra plegamiento (Figura II.24), basculamiento y zonas de cizalla. El plegamiento se ha determinado en dos direcciones, perpendiculares entre sí: una con rumbo NW-SE y la otra NE-SW, aproximadamente.⁸⁴



Figura II.24 Registro de eventos de compresión en las rocas de la Formación Esperanza: cuarzo de segregación y microplegamiento.

⁸³ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 144.

⁸⁴ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 53.

El fallamiento de la Formación Esperanza se ha registrado con rumbo general NW-SE, y otro con rumbo E-W. En la zona de calizas se observan pliegues con ejes de dirección general NW-SE. Además, está intrusionada por un dique de composición riolítica (Dique La Concepción) presentándose en los márgenes alteración argílica y silicificación.⁸⁵

II.3.2 Estructuras Cenozoicas

Las rocas de edad Cenozoica presentan estructuras relacionadas a *tectónica extensional*, la cual inició en la región durante el Eoceno (55.8-33.9 Ma), contemporáneo al depósito del material que formaría el Conglomerado Guanajuato y probablemente continuó hasta el Plioceno (5.8-2.6 Ma) y en varios periodos de actividad.⁸⁶

Estos esfuerzos tensionales debido a un evento de movimiento ascendente, provocaron la formación de fallas normales en la región, las cuales presentan en general, rumbo NW-SE. Nieto-Samaniego (1985) realizó un estudio mediante dos métodos diferentes para verificar esta tendencia, encontrando que las direcciones son predominantemente NW 30° - 50° SE, existiendo algunas con rumbo NE 30°-40° SW. Estas fallas presentan diferentes edades relativas, es decir, en ciertas zonas, las de rumbo NW-SE cortan a las NE-SW, y en otras zonas, es al contrario. Esto permitió concluir que han existido varias etapas de reactivación.⁸⁷

Estas fallas normales dieron origen a los tres famosos sistemas de vetas de la región donde fue emplazada una extensa y rica mineralización en plata y oro, la cual ha sido explotada desde el siglo XVI: de La Luz, de La Sierra y Veta Madre, todas con franca orientación NW-SE (Figura II.25).

⁸⁵ Álvarez Maya, V. M. (1997) *op cit.*, p. 37.

⁸⁶ Aranda-Gómez, J.J. et al. (2012) *op. cit.*, p. 144.

⁸⁷ Nieto-Samaniego, A.F. (1985), *op. cit.*, p. 55 y 64.

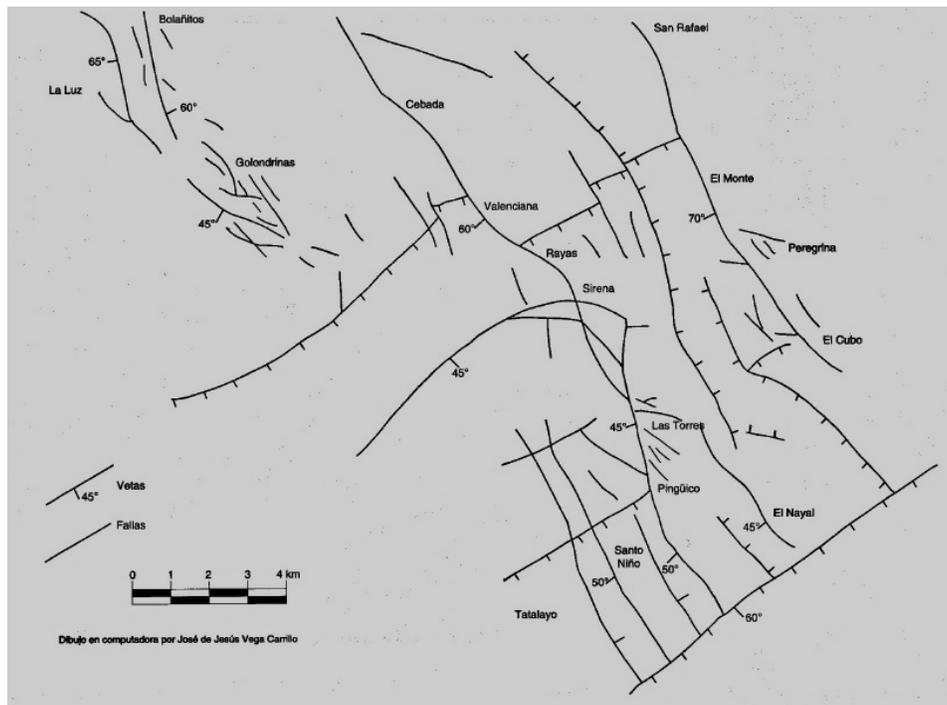


Figura II.25 Sistemas de Vetas del Distrito Minero de Guanajuato.⁸⁸

Las etapas del fallamiento cenozoico han sido reportadas en cinco fases por Nieto-Samaniego (1990-1992), las cuales se resumen en la Tabla II.2.

Sobre los mecanismos responsables, el mismo autor los ha considerado que ocurrieron en un periodo de al menos 40 Ma para una etapa, con reactivaciones sucesivas, desde el Paleoceno al Pleistoceno, aunque no se conoce si hubo activación en el Mioceno porque no hay rocas que registren dicha actividad.⁸⁹

⁸⁸ Vasallo, L. F., Martínez-Reyes, J., Paris, J.P. (1996) *Estructuras Circulares y Lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México y su significado en la Prospección Minera*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 13, núm. 2, p. 254.

⁸⁹ Nieto-Samaniego, A.F. 1990 (1992) *Fallamiento y Estratigrafía Cenozoicos en la parte Sudoriental de la Sierra de Guanajuato*, Revista del Inst. de Geología, UNAM, vol. 9, núm. 2, p. 153-154.

Tabla II.2 Fases de fallamiento Cenozoico en el Distrito Minero de Guanajuato.

| FASE | EVENTOS GENERADOS |
|------|--|
| 1 | Generación de fosas tectónicas; depósito del Conglomerado Guanajuato. Formación de la Falla La Aldana, rumbo NE-SW (Paleoceno-Eoceno) |
| 2 | Después del depósito del Conglomerado Guanajuato y antes de la Ignimbrita Calderones. Falla meridional del graben de San Nicolás, con rumbo NW-SE (Oligoceno Temprano). Corta al Conglomerado Guanajuato sin afectar la Ignimbrita Calderones. |
| 3 | Estructuras que afectan a la Ignimbrita Calderones, con rumbo NE-SW y NW-SE, entre ellas la Veta Madre. |
| 4 | Formación de la Falla del Bajío (Plioceno-Pleistoceno). |
| 5 | Formación del graben de La Saucedá que desplaza a la Falla del Bajío. |

Por otro lado, Aranda-Gómez et al. (2012) reportan que por las variaciones en el rumbo e inclinación de las estructuras, se consideran *tres pulsos de extensión* ocurridos durante el Paleógeno (Paleoceno-Eoceno-Oligoceno; 65.5 a 23.0 Ma):

- (1) extensión NE-SW produciendo fallas normales al NW,
- (2) extensión NW-SE, produciendo fallas normales al NE como La Aldana y Del Amparo, y
- (3) nueva extensión NE-SW, produciendo fallas y reactivando a las de orientación NW-SE como la Veta Madre, La Leona y El Cubo.⁹⁰

Las estructuras cenozoicas que se presentan en la zona de estudio son: al NW la Falla La Aldana, al Sur la Falla Del Amparo y Falla San Clemente, y, dominando el área, en una dirección NW-SE, la Veta Madre.

La *Falla La Aldana* tiene una dirección NE-SW y buzamiento de 65° al SE; se reporta que se formó entre el Paleoceno y el Eoceno (65.5 a 33.9 Ma), siendo más antigua que la Veta Madre, y desplazada por ésta en la zona de Valenciana. En esta área, la Falla La Aldana presenta irregularidades o desplazamientos en su dirección, causados probablemente por el fallamiento normal de la Veta Madre. Los desplazamientos tienen rumbo general NW-SE y echado 80° al SW.⁹¹

⁹⁰ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 147.

⁹¹ Álvarez Maya, V. M. (1997) *op. cit.*, p. 40.

La *Veta Madre* es la estructura cenozoica más importante del DMG. Se la ha asignado de 20 a 26 km de longitud⁹² y espesor de unos cuantos centímetros y hasta 10 y 90 metros.⁹³ Sus desplazamientos verticales van de 300 m a 1200 m (Orozco, 1921), 1500 m (Gross, 1975), de 350 m a 1400 m en la mina Las Torres (Álvarez Maya, 1997) y de 1200 m en la Valenciana y hasta 1700 m en Las Torres (Aranda-Gómez, et al. 2012).⁹⁴ El rumbo general es NW-SE con echado al SW⁹⁵ (Figuras II.25 y II.26).



Figura II.26 Vista del famoso reliz de la Veta Madre de Guanajuato desde la Mina de Rayas.

Se considera que esta estructura se generó en la fase tercera del fallamiento que reportó Nieto-Samaniego (1990-1992), al final del Oligoceno. Presenta estrías horizontales y sobre éstas, otras que indican un movimiento vertical.

⁹² 20 km (Orozco, 1921), 25 km (Antúnez, 1964), 26 km (Echegoyén, 1970), 20 Km (Aranda-Gómez, et al. ,2012).

⁹³ de 25 a 50 m (Orozco, 1921), de 25 a 50 m (Antúnez, 1964), 25 m (Echegoyén, 1970), de unos cuantos centímetros hasta 90 m (Álvarez Maya, 1997).

⁹⁴ Guiza *et al* (1949) le asignan 940 m en la parte central (Valenciana); Gross (1975) lo calcula en sólo 500 m para la vecindad de mina Sirena; Randall (1990b) lo pone de 400 a 500 m, para la parte central, y Buchanan (1979), le adjudica 1,200 m de desnivel en la parte central, y 1,700 en la cercanía de mina las Torres. Por su parte, Aranda y Vassallo (2007) consignan los mismos desniveles que Buchanan, pero de manera inversa, es decir, 1,700 m en la parte central y 1,200 para la zona de Las Torres, *en* Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *op. cit.*, pp. 35-36.

⁹⁵ Antúnez (1921) reporta un rumbo NW 42°SE y echado 38°-45° al SW. (p. 132).

Un patrón estructural reportado por Álvarez Maya (1997) indica zonas de dilatación, asociadas a fallas de movimiento lateral, en este caso, lateral izquierdo con fuerte fracturamiento lo que favoreció la circulación de soluciones mineralizadas.

Estas zonas de dilatación se presentan a la altura de La Valenciana, La Cebada y al NW del Cerro Pelón. Estas zonas de dilatación son la respuesta a un movimiento lateral que provocó fracturamiento hacia la parte NNW y compresión hacia la parte SSE, los cuales permitieron el emplazamiento de material magmático, formando centros de vulcanismo (como los domos) y conductos de actividad hidrotermal.⁹⁶

En algunas zonas, la Veta Madre presenta sinuosidades tipo sigmoidal sin perder su rumbo NW-SE. Esto se ha interpretado como la respuesta a la diferente resistencia de las rocas por donde pasa esta falla, presentándose un fracturamiento más débil en las rocas más dúctiles como las del Cenozoico (Formación Esperanza), fuerte en el Conglomerado Guanajuato y mayor en las rocas volcánicas del Cenozoico por ser más frágiles.

En el área de estudio, la Veta Madre es intersectada por *tres fallas*. Hacia la zona del NW del Distrito, a la altura de la comunidad de La Valenciana, por la *Falla La Aldana*, la cual, como ya se dijo, es más antigua que la Veta Madre y presenta desplazamientos provocados por los movimientos de la Veta Madre. Hacia la zona SE del Distrito, en las zonas aledañas a la comunidad de Peñafiel, la intersección es por dos vetas de rumbo NE-SW: las *Fallas Del Amparo* y *San Clemente*.⁹⁷

La *Falla Del Amparo* es una veta estéril con dirección NE 13° SW, echado 75° al SE y con potencia de 1 m.⁹⁸ Sus inicios se localizan desde la zona de Marfil, Gto. y se extiende atravesando parte de la ciudad de Guanajuato, hasta su intersección con la Veta Madre en la zona de Peñafiel, como puede observarse en la Hoja Guanajuato reportada por Echevoyén S., et al. (1970).⁹⁹ En esa misma Carta, se observa que la *Falla San Clemente* se desprende de la Falla Del Amparo, en la zona aledaña al Cerro de El Meco.

⁹⁶ Álvarez Maya, V. M. (1997) *op. cit.*, Resumen.

⁹⁷ Echevoyén S., J., et al. (1970), *op. cit.*, Hoja Guanajuato.

⁹⁸ Orozco, R. (1921) *op. cit.*, p. 64.

⁹⁹ Echevoyén S., J. et al. (1970) *op. cit.*, Hoja Guanajuato.

Con relación a las rocas, Echegoyén S., et al. (1970) reportan que los depósitos clásticos del Terciario presenta echados generalmente mayores (de 25° a 46°) que los de las rocas de las capas superiores, que son casi horizontales. Aranda-Gómez y McDowell (1998) reportan un análisis estadístico de los datos de pendientes del Conglomerado Guanajuato y la Ignimbrita Calderones, mostrando que estas rocas buzan generalmente hacia el NE pero la inclinación promedio del primero es significativamente mayor que las ignimbritas.¹⁰⁰ Los datos se resumen a continuación:

| | Conglomerado Guanajuato | Ignimbrita Calderones |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Inclinación | NE y ENE | NE |
| Inclinación de las capas | entre 35° y 20° | entre 25° y 10° |

Y reportan también que estas dos formaciones fueron depositadas casi horizontalmente ($\leq 10^\circ$) y que la subsecuente inclinación se relaciona con extensión, ya que no se presenta evidencia de deformación compresiva en estas rocas.¹⁰¹

II.4.- Mineralizaciones

Según Ramos-Arroyo et al. (2004), en la zona del DMG se presentaron tres épocas metalogenéticas. La primera en el *Cretácico*, con la formación de cuerpos tabulares de sulfuros masivos emplazados en rocas Mesozoicas de la Asociación Vulcano-Sedimentaria,¹⁰² habiéndose localizado dos cuerpos en la zona norte del Distrito. Esto es confirmado por Randall-Roberts (2009) quien reporta pequeños depósitos de sulfuros estratiformes en la Secuencia Vulcano-Sedimentaria Mesozoica cerca de Santa Rosa, Gto.¹⁰³

¹⁰⁰ Aranda-Gómez, J.J. et al. (2012) *op. cit.*, pp. 146-147.

¹⁰¹ Ídem, p. 146.

¹⁰² Randall-Roberts, J.A., Saldaña, E., Clark, K.F. (1994) *Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México*, Economic Geology, 89, pp. 1722–1751 (resumen) en Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C. D. (2004) *Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 21, núm. 2, p. 273.

¹⁰³ Randall-Roberts, J.A. (2009b) *Reflexiones sobre la geología del distrito minero de Guanajuato*, en Clark, K.F., Salas-Pizá, G., and Cubillas-Estrada, R., eds., Geología económica de México, Pachuca (Hgo.), Servicio Geológico Mexicano, p. 607–613 en Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris, P., Vassallo-Morales, L.F., Godchaux, M., Bonnischsen, B., Martínez-Reyes, J., Ortega-Rivera, M.A. (2012) *Geology and tectonics of the southern portion of the Sierra de Guanajuato*, The Geological Society of America, Field Guide 25, p. 147.

La segunda época fue en el *Paleoceno*, al emplazarse un batolito granítico hacia el oeste del Distrito, donde se formaron yacimientos de tungsteno, selenio, bismuto, cobre, plata, plomo y zinc con trazas de minerales radioactivos en cuerpos pegmatíticos.¹⁰⁴

La tercera y más importante ocurrió en el *Oligoceno*, asociada a la actividad volcánica del Terciario por procesos de subducción.¹⁰⁵ La disposición estructural que se generó en la zona de este Distrito Minero durante el Cenozoico fue la más propicia para el emplazamiento de soluciones hidrotermales mineralizantes en esta tercera época, formando los tan famosos sistemas de Vetas de oro y plata del Distrito. En los más de 450 años de explotación, se han producido más de 214 toneladas métricas de oro y 37,00 toneladas de plata.¹⁰⁶

Estas soluciones pudieron proceder, como ya se dijo, de un cuerpo intrusivo granítico o en la fase final de la actividad volcánica del Terciario, alojando los minerales tanto en las cavidades formadas del fracturamiento como por reemplazamiento de rocas preexistentes,¹⁰⁷ a intervalos irregulares y en ocasiones en forma de vetilleo, por lo que la mineralización no es uniforme a lo largo de las vetas.

Gross (1975) reporta que en 1968 las perforaciones a niveles más profundos en el SE de la Veta Madre, se descubrieron nuevos cuerpos mineralizados los cuales no presentaban evidencia de ser de origen hidrotermal por cercanía a granitos, o de soluciones provenientes del manto, sino que se pensó que era de rocas sedimentarias del Mesozoico que subyacen en el área. El agua subterránea alcalina en estas rocas fue calentada a temperaturas arriba de 350°C durante el periodo de vulcanismo en el Oligoceno medio y las soluciones calientes lixiviaron los materiales de veta de las rocas envolventes y escaparon hacia arriba a través de las fallas formadas por subsidencia de la corteza seguida de vulcanismo.

¹⁰⁴ Martínez-Reyes, J., Vassallo, L.F., Franco, F.J.(1995) *Geología y potencial minero de la porción central-poniente del Estado de Guanajuato: Guanajuato, México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Centro, Gobierno del Estado de Guanajuato, Secretaría de Desarrollo Económico, Dirección de Promoción Minera, 70 p. en Ramos-Arroyo, Y.R., et al. (2004) *op cit.*, p. 273.

¹⁰⁵ Ramos-Arroyo, Y.R., et al. (2004) *op cit.* p. 273.

¹⁰⁶ En el periodo de 1701 a 2004, en Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op cit.*, p. 147.

¹⁰⁷ Echegoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, p. 30.

La disposición del material de veta durante el Oligoceno superior fue causado primero por un descenso en la temperatura estimado de 10°C por cada 100 m. La mineralización se formó con la deposición de cuarzo masivo, calcita y adularia con pequeñas cantidades de oro y plata, con la alteración de la roca encajonante, seguido de la introducción de cuarzo gris tipo calcedonia con cantidades económicas de oro y plata.¹⁰⁸

Por otro lado, Randall-Roberts et al. (1994) reportan que, aunque al principio la fuente de los metales en los yacimientos de Guanajuato fue atribuida a procesos relacionados con intrusiones graníticas o lixiviación de rocas volcánicas Terciarias o de estratos sedimentarios del Mesozoico, por estudios isotópicos de oxígeno, carbón y plomo se sugiere que la deposición de menas está relacionada en parte a fluidos de composición magmática los cuales se mezclaron con agua meteórica intercambiada isotópicamente que circuló a través de una pila volcánica.¹⁰⁹

Uno de los modelos más aceptados para explicar la mineralización es el de Buchanan (1979), quien propuso que las menas de poca profundidad y las intermedias, comparadas con las más profundas se originaron de fluidos con dos diferentes composiciones (Figura II.27). Según este modelo, la asociación mineralógica de los horizontes superiores y medios es:

acantita + adularia + pirita + electrum + calcita + cuarzo,

y la de menas profundas:

*calcopirita + galena + esfalerita + adularia + cuarzo + acantita.*¹¹⁰

¹⁰⁸ Gross, W.H. (1975) *New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, México*, Economic Geology, 70, pp. 1175-1189 (resumen).

¹⁰⁹ Randall-Roberts, J.A., et al. (1994) op. cit. en Ramos-Arroyo, Y.R., et al. (2004) *op cit.*, p. 273.

¹¹⁰ Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 147.

El modelo de Buchanan se resume en seis etapas:

- (1) formación de la Veta Madre con fracturamiento al alto y al bajo,
- (2) emisión estéril de cuarzo y calcita rellenando el fracturamiento de la primera etapa, además de alteración propilítica.
- (3) fuerte fracturamiento por tensión con orientación NW por movimientos remanentes,
- (4) relleno de fracturas por una segunda emisión de soluciones de cuarzo, calcita y minerales de oro y plata y sulfuros como accesorios, con argilización de feldespatos,
- (5) fracturamiento con orientación NE por nuevos movimientos, y
- (6) relleno de estas nuevas fracturas por una tercera emisión de soluciones mineralizantes de calcita, talco, clorita, cuarzo, pirita y minerales de oro y plata.¹¹¹

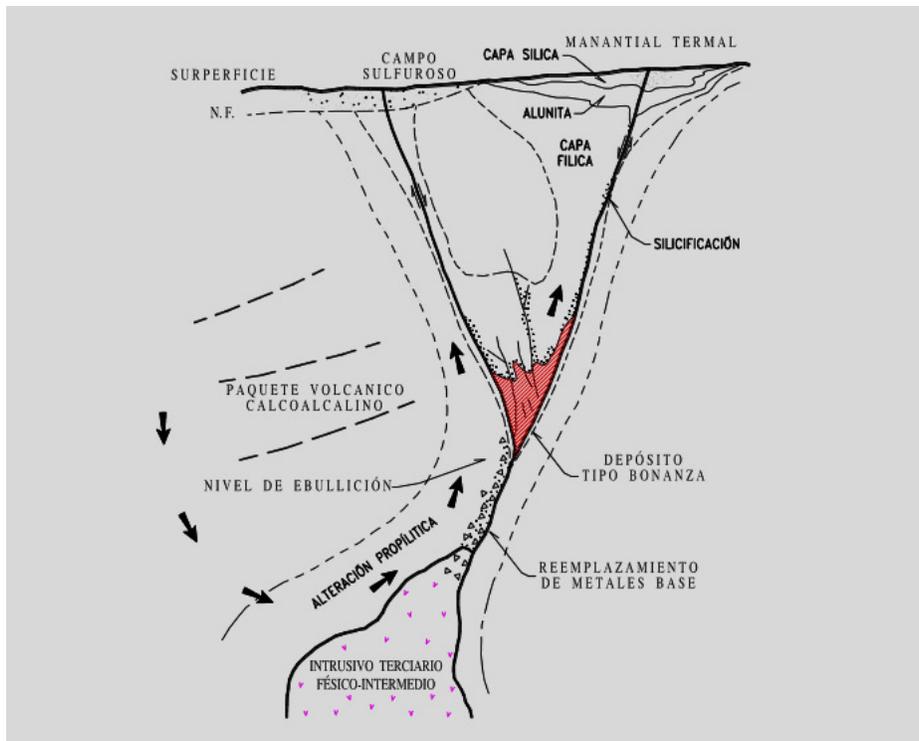


Figura II.27 Esquematzación del modelo de Buchanan.¹¹²

¹¹¹ Álvarez-Maya, V.M. (1997) *Comportamiento de la Veta Madre en el Basamento Mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato* Trabajo de Diplomado en Especialista en Geología Económica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí, p. 47-48.

¹¹² Tomada de Vogel G., F. (sin año) *Generalidades del Yacimiento del Distrito Guanajuato*.

La edad de la mineralización fue reportada por Gross (1975) en estudios de K-Ar en adularia. Los datos encontrados en la bibliografía son: 28 Ma (Nieto-Samaniego, 1985), 27.4 ± 0.4 a 29.2 ± 2.0 (Nieto-Samaniego, 1990, 1992), 27.4 Ma (Aranda-Gómez et al., 2012) y $30.7 - 27.0$ Ma (Martínez-Reyes, J.J. et al., 2015).¹¹³ En todos los casos, la mineralización corresponde a un evento del Oligoceno Tardío.

¹¹³ Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *op. cit.*, p. 61 y Nieto-Samaniego, A.F. 1990 (1992) *op. cit.*, p. 153; Aranda-Gómez, J.J., et al. (2012) *op. cit.*, p. 147 y Martínez-Reyes, J.J., Camprubí, A., Uysal, I.T., Iriondo, A. (2015) *Geochronology of Mexican mineral deposits. II: Veta Madre and Sierra epithermal vein systems, Guanajuato district*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 67, núm. 2, p. 350.

CAPÍTULO III

EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

“Si en las luchas con la Naturaleza se llega a triunfar, cuando se procede con sujeción a las grandes leyes que la gobiernan, convencer a los hombres es imposible, y hay que resignarse a que las energías se agoten inactivas, mientras el tiempo discurre estérilmente.”

Ponciano Aguilar

CAPÍTULO III.- EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

Con base en lo reportado por Echegoyén et al. (1970), Nieto-Samaniego (1985) y Álvarez Maya (1997),¹ se elaboraron Tablas Cronológicas que se presentan más adelante, donde se explican en los periodos correspondientes, los principales eventos geológicos generados en la región del Distrito Minero de Guanajuato, desde el Triásico hasta el Pleistoceno. La lectura de los eventos en cada periodo es en sentido normal y sólo en algunos casos se especifica el dato de millones de años.

Los primeros eventos geológicos en la región se generan al inicio de la era **Mesozoica**, en periodo Triásico con el emplazamiento de rocas volcánicas de composición basáltica y sedimentos arcillosos, ambos de origen marino. En el Jurásico se presentan dos grandes intrusiones, diorítica y tonalítica, que darían origen al *Complejo Filoniano*, seguido de transgresiones y regresiones marinas, lo que originó una segunda fase de sedimentación, generando las rocas de la *Formación Esperanza*, las cuales posteriormente fueron sometidas a esfuerzos compresivos produciendo foliación, plegamiento y metamorfismo de bajo grado. Durante el Cretácico Temprano se desarrolló la Orogenia Oregoniana que produjo aumento en la corteza oceánica y levantamiento de montañas, que luego fueron erosionadas. La colisión de la Dorsal de Pacífico Oriental con la placa Norteamericana provocó cabalgamientos y plegamientos tipo isoclinal, así como planos de esquistosidad. También en el Cretácico ocurrió la primera mineralización, formándose cuerpos tabulares de sulfuros masivos en las rocas Mesozoicas de la Asociación Vulcano-Sedimentaria.

¹ Echegoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, pp. 28-29.

Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *Geología de un Área de 237 km² al Norte de Guanajuato, Gto.*, Tesis profesional Ingeniero Geólogo, Facultad de Minas, Universidad de Guanajuato, pp. 60-61

Álvarez-Maya, V.M. (1997) *Comportamiento de la Veta Madre en el Basamento Mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato* Trabajo de Diplomado en Especialista en Geología Económica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí, pp. 51-54.

Al inicio del **Cenozoico** se produce la Orogenia Larámide, que ya se presenta desde finales del Cretácico, generando nuevos esfuerzos de compresión, plegamiento y metamorfismo regional de bajo grado, generando pizarras, filitas y esquistos en los sedimentos marinos.

Del Paleoceno al Eoceno se generan cuencas donde se depositarían los materiales de erosión y formarían el *Conglomerado Guanajuato* y a finales del Paleoceno también se presentan los primeros eventos volcánicos que culminarían en el Oligoceno. Durante esta época se deposita la Formación *Losero* en pequeñas cuencas lacustres y posteriormente la *Ignimbrita Bufa*, además de presentarse movimientos ascendentes que producen fallamientos con dirección NW-SE, zonas de dilatación con fuerte fracturamiento y fosas tectónicas donde se deposita la *Ignimbrita Calderones*. En el Oligoceno medio existe un vulcanismo efusivo formando las rocas de la *Andesita Cedro* y luego un nuevo fallamiento por distensión, con dirección NE-SW, y posteriormente otro de tipo normal. En el Oligoceno Tardío se presenta la mineralización cenozoica en el sistema de fallas con dirección NW-SE.

EL MESOZOICO

CRETÁCICO

Emplazamiento de la Diorita La Palma (Barremiano-Aptiano, 122 Ma) en el arco insular intraoceánico.

Continúa la sedimentación y actividad volcánica en la cuenca marginal.

Colisión de la Dorsal del Pacífico Oriental con la Placa Norteamericana y cabalgamiento de la secuencia del arco insular intraoceánico sobre la cuenca marginal. Esto se presenta en la región por cabalgaduras, pliegues tipo isoclinal y planos de esquistosidad subparalelos a los planos de estratificación.

Orogenia Oregoniana al norponiente de la República Mexicana en el Cretácico Temprano. Los esfuerzos compresivos son NNE-SSW y la dirección del transporte tectónico es NNE-NE. Rápido crecimiento de la corteza oceánica y del movimiento ascendente. El nuevo plegamiento formó montañas que se erosionaron, seguido de emisiones riolíticas.

Primera mineralización por emplazamiento de sulfuros masivos en las rocas mesozoicas.

JURÁSICO

Hacia finales del Jurásico y principio del Cretácico se presentan dos grandes intrusiones: diorítica y tonalítica (Tonalita Cerro Pelón).

Metamorfismo de bajo grado y dos periodos de esfuerzo de compresión, produciendo fuerte foliación y primera fase de plegamiento.

Transgresiones y regresiones marinas.

Segunda facie de sedimentación, depósito de calizas entre el arco insular y el Continente Laurasia formando una cuenca marginal.

Mayor intensidad de movimientos orogénicos, modificación del relieve.

Culmina la apertura del Océano Atlántico y de la formación de un arco insular intraoceánico en la zona de subducción oriental (Oxfordiano, 157 Ma).

TRIÁSICO

Emanación de rocas volcánicas submarinas de composición basáltica.

Depósito de lutitas, sedimentos arcillosos y calcáreos en cuenca marina.

Ruptura de Pangea: Gondwana al Sur y Laurasia al Norte (hacia 210 Ma).

EL CENOZOICO

| | |
|--------------------|---|
| PLEISTOCENO | Último evento ígneo, con derrames de fisura de rocas basálticas (Cristo Rey). |
| PLIOCENO | Deposición de tobas lacustres de composición ácida. |
| MIOCENO | Un periodo de erosión o no depositación impidió que el Oligoceno y el Mioceno estuvieran concordantes. Poco después de la actividad volcánica se presentan movimientos verticales y emplazamientos de intrusivos de composición básica (Mata y La Luz) y posteriormente de cuerpos ácidos. |
| OLIGOCENO | <p>Movimiento ascendente lento seguido de eventos volcánicos importante. Depósito de arenisca (Losero) en pequeñas cuencas lacustres. Emanación de riolitas (Igenimbrita Bufa). Nuevo fallamiento con dirección NW-SE lateral izquierdo en el Oligoceno Temprano; zonas de dilatación con fuerte fracturamiento. Esfuerzo tensional por movimientos ascendentes formando fosas tectónicas donde se depositan ignimbritas (Calderones). En el Oligoceno Medio se presentan dos fases de vulcanismo efusivo: rocas andesíticas y basálticas (Cedro); emisión de riolitas por las fracturas formando domos alineados y rocas basálticas formando diques de composición calcosódica. Nuevo fallamiento NE-SW por distensión. Segunda etapa de vulcanismo con el emplazamiento de riolita (Chichíndaro). Nueva etapa de fallamiento tipo normal formando estructuras de pilares y fosas tectónicas. Mineralización de las fracturas (28 Ma) principalmente las del sistema NW-SE.</p> |
| EOCENO | <p>Entre el Paleoceno y Eoceno se forman fosas tectónicas por fallamiento (dirección NW-SW, echado NW-SE). Depósito de un conglomerado formado en un ambiente de pie de montaña bajo condiciones continentales, producto de la erosión (Conglomerado Guanajuato). Finaliza el periodo de levantamiento y erosión. Nuevo vulcanismo y depósito de una arenisca (Losero). ¿?</p> |
| PALEOCENO | <p>Por los movimientos orogénicos de finales del Mesozoico, a inicios del Terciario queda expuesta a la erosión una gran masa de rocas sumergidas. Cesa el esfuerzo compresivo. Inicio de la Orogenia Larámide a finales del Cretácico y principios del Paleoceno (65–60 Ma). Nuevos esfuerzos compresivos, con dirección NW-SE; plegamiento y metamorfismo regional de bajo grado en las lutitas y sedimentos calcáreos del Triásico, pasando a pizarras, filitas y esquistos. Emplazamiento de rocas intrusivas (cuarzo-diorítica) y eventos volcánicos de tipo riolítico a finales del Paleoceno. Entre finales del Paleoceno y principios del Eoceno se forman cuencas donde se depositan los materiales producidos por la erosión (rocas ígneas, efusivas, intrusivas y sedimentos) que formarían el Conglomerado Guanajuato.</p> |

CAPÍTULO IV

RIESGOS GEOLÓGICOS

*Dónde está la sabiduría que se nos ha perdido en conocimiento?
¿Dónde está el conocimiento que se nos ha perdido en información?*

T.S. Elliot

CAPÍTULO IV.- RIESGOS GEOLÓGICOS



IV.1.- Introducción

Gracias al desarrollo de la tecnología, el avance del conocimiento científico que ha experimentado nuestro planeta en los últimos tiempos nos obliga necesariamente a estudiarlo en relación con el Hombre. En el caso donde se involucra la aplicación directa del conocimiento de la información geológica, en todo el amplio espectro de las interacciones entre la población y el medio físico, se adentra específicamente al campo de la Geología Ambiental.

El conocimiento geológico es un concepto fundamental de la Geología Ambiental. En la mayoría de los casos ese conocimiento aporta un abanico de soluciones a los problemas ambientales e incide directamente en la solución de la problemática generada por la interrelación de actividades antrópicas con el medio físico.

Un *riesgo*, es cualquier proceso natural que representa una amenaza para la vida humana o la propiedad.¹ Los efectos de este tipo de riesgos cambian con el tiempo al cambiar los patrones de uso de la tierra; así, el crecimiento urbano puede influir en que se ocupen zonas marginales de una comunidad, como laderas abruptas y llanuras en peligro de inundación. Los procesos geológicos que provocan riesgos naturales son básicamente de dos tipos, según se muestra en el siguiente cuadro.

| | |
|---|--|
| PROCESOS GEODINÁMICOS EXTERNOS | Deslizamientos y desprendimientos Hundimientos y subsidencias Erosión Expansión y colapso de suelos |
| PROCESOS GEODINÁMICOS INTERNOS | Terremotos y tsunamis Vulcanismo Diapirismo |

La Geología Ambiental contempla otro tipo de riesgos: los *antropogénicos*, es decir, aquellos provocados por la intervención y modificación directa por parte del hombre sobre el medio ambiente o la dinámica de los procesos geológicos naturales.²

La ciudad de Guanajuato ha estado expuesta a ciertos fenómenos naturales que han provocado diferentes eventos donde tanto la población como sus bienes materiales se han visto afectados. Los principales fenómenos de este tipo que se tienen registrados a lo largo de su historia son de tipo climatológico: por un lado, las duras sequías por falta de precipitación pluvial, y por otro, paradójicamente, las severas inundaciones, como las de los años 1905 y 1969. Sin embargo, por las características geológicas y geomorfológicas de su entorno, esta ciudad es significativamente vulnerable a otro tipo de riesgos: los geológicos.

¹ González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004) *Ingeniería Geológica*, Pearson- Prentice Hall, España, p. 6.

² <https://fuentesdeciencia.files.wordpress.com/2008/12/riesgos-geologicos-veronica-asensio.pdf> (fecha de consulta: 3 de abril 2016).

Un riesgo latente para la ciudad es el desprendimiento de rocas. Además, por su actividad minera a lo largo de más de 500 años la ciudad está expuesta también a peligros provocados por actividades antrópicas. Tal es el caso de la presencia de jales antiguos y modernos localizados en su entorno y en el ámbito de la zona urbana. En este capítulo se hará referencia a estos dos tipos de riesgos.

IV.2.- Desprendimiento de bloques de roca

Este fenómeno que sucede en zonas montañosas implica un riesgo geológico importante, pues representa un peligro de alto grado para las poblaciones situadas al pie de las laderas, dado que los bloques y avalanchas rocosas pueden producir graves daños personales o materiales.

Los desprendimientos, caídos o derrumbes son movimientos abruptos. Se originan en acantilados y en pendientes muy fuertes; el movimiento es prácticamente en caída libre. El fenómeno es producido por la presencia de discontinuidades estructurales (fallas y fracturas), planos de estratificación o grietas de tracción.³

En la literatura consultada prácticamente no hay antecedentes de estudios referentes a los desprendimientos de roca en el entorno de la ciudad de Guanajuato. Escasamente aparece un reporte de la Secretaría de Seguridad Pública del Gobierno del Estado de Guanajuato publicado en el 2005 referente a los peligros geológicos en el Cerro de El Meco,⁴ en el cual se presenta el estudio topográfico y geológico de dicho cerro, reportando las fallas y fracturas de los bloques susceptibles de deslizamiento, así como la probable dirección de pendiente de caída; define dos zonas de peligro:

(a) la primera entre las curvas de nivel 2090 y 2100 m con cambio de pendientes de 90° a 45° donde se presentan bloques de 3 a 4 m de diámetro de riolita, con posible deslizamiento al SW 45°.

³ <http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/geologico.php> Fenómeno Geológico, Marco Conceptual.

⁴ Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Obras Públicas y Secretaría de Seguridad Pública (2005) *Estudio de Peligros Geológicos de Localidades del Estado de Guanajuato, Cerro El Meco, Guanajuato, Gto.*, Convenio de Colaboración, 21 pp.

Las distancias de deslizamiento pendiente abajo son de hasta 260 m y en todos los casos, el área de contención es la zona habitada de la Colonia Pastita y viviendas de la Carretera Panorámica. Se añade peligro por la presencia de un arroyo tributario del Río de Pastita.⁵

(b) la segunda se ubica entre las curvas de nivel 2045 y 2090 m. Los bloques son de toba riolítica y en menor proporción de conglomerado. Las pendientes varían de 45° a 25°. No se reportan las dimensiones ni direcciones de deslizamiento.⁶

En este capítulo ofrecemos algunas observaciones muy generales de las condiciones de riesgo geológico que se presentan sobre la parte suroriental de la zona de estudio, como resultado del trabajo cartográfico a escala 1:5 000. No debe considerarse entonces como un estudio donde se aplicó la metodología que amerita el caso, sino simplemente como la manifestación de la inquietud que despertó en nuestro espíritu geológico.

Geológicamente la parte suroriental de la zona de estudio está constituida por rocas mesozoicas, especialmente filitas de la Formación Esperanza, y por las formaciones cenozoicas del Distrito Minero de Guanajuato (Conglomerado Guanajuato, Formación Losero, Ignimbrita Riolítica Bufa e Ignimbrita Andesítica Calderones); las fallas de la Veta Madre, del Amparo y de San Clemente aparecen como las estructuras tectónicas más relevantes (ver *Carta Geológica* anexa). Las cimas de los cerros La Sirena y El Meco que miran hacia la ciudad de Guanajuato hacia el poniente y surponiente se revelan como las cúspides más prominentes. En relación con la presencia de la zona habitacional de la ciudad, es el cerro El Meco el que representa el riesgo más inminente de desprendimiento y deslizamiento de bloques de rocas que pueden afectar la zona urbana (Figura IV.1).

Dando por descontado que el agente más importante para el deslizamiento de bloques de roca es la gravedad, los factores condicionantes fundamentales para la ocurrencia del fenómeno están relacionados con las características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas del área.

⁵ *Ídem*, pp. 15-16.

⁶ *Ídem*, p. 16.

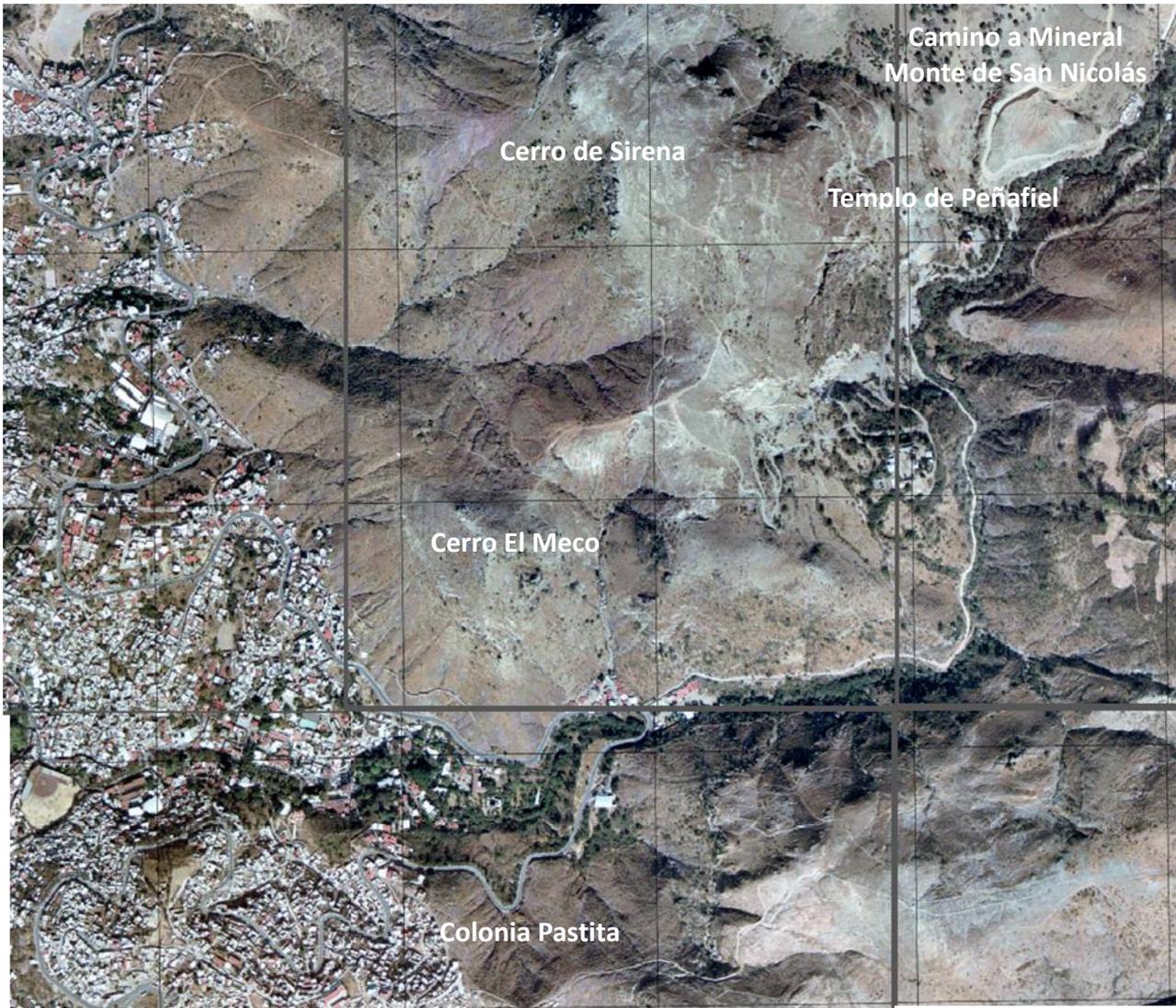


Figura IV.1 Porción Suroriental del área de estudio donde se localizan los sitios de inminentes deslizamientos de rocas.

El cerro El Meco se eleva por encima de los 2 250 m de altitud y presenta hacia la ciudad una pendiente muy pronunciada. Es un área totalmente desforestada. Geológicamente está constituido, de la base hacia la cima, por un gran espesor del Conglomerado Guanajuato que soporta esporádicamente algunos estratos de la Formación Losero, algunos decenas de metro de la Ignimbrita (Riolita) Bufa que en esta zona se adelgaza y desaparece paulatinamente y por la Ignimbrita (Andesita) Calderones de considerable espesor (Figura IV.2). La secuencia está afectada por un sistema de fallas/fracturas de orientación NE-SW.



Figura IV.2 Estratigrafía del Cerro El Meco. Fotografía tomada desde el flanco SE.

Las Ignimbritas Bufo y Calderones que sobresalen aparecen en el relieve como pequeños acantilados, en donde se individualizan los bloques de roca en función de la densidad del fracturamiento/fallamiento que les afectan. La posición subhorizontal de las diversas efusiones piroclásticas de la Ignimbrita Calderones favorece también, junto con los agentes de intemperismo y erosión, dicho fenómeno.

El fracturamiento/fallamiento NE-SW producido por el tectonismo del área, la pronunciada pendiente esculpida por la erosión y la acción de la gravedad, han dado origen no solamente al deslizamiento de bloques de roca, sino también el colapso de grandes segmentos del cerro donde se ubica el tiro de Peñafiel, constituido por la Ignimbrita Calderones. Afortunadamente se localizan en una zona deshabitada y por ello el riesgo geológico que representa el fenómeno es mínimo.

A continuación se presenta un registro fotográfico de la zona del Cerro El Meco y del área aledaña al Mineral de Peñafiel, donde se observa el estado actual de las rocas y algunos de los agentes de su intemperización.

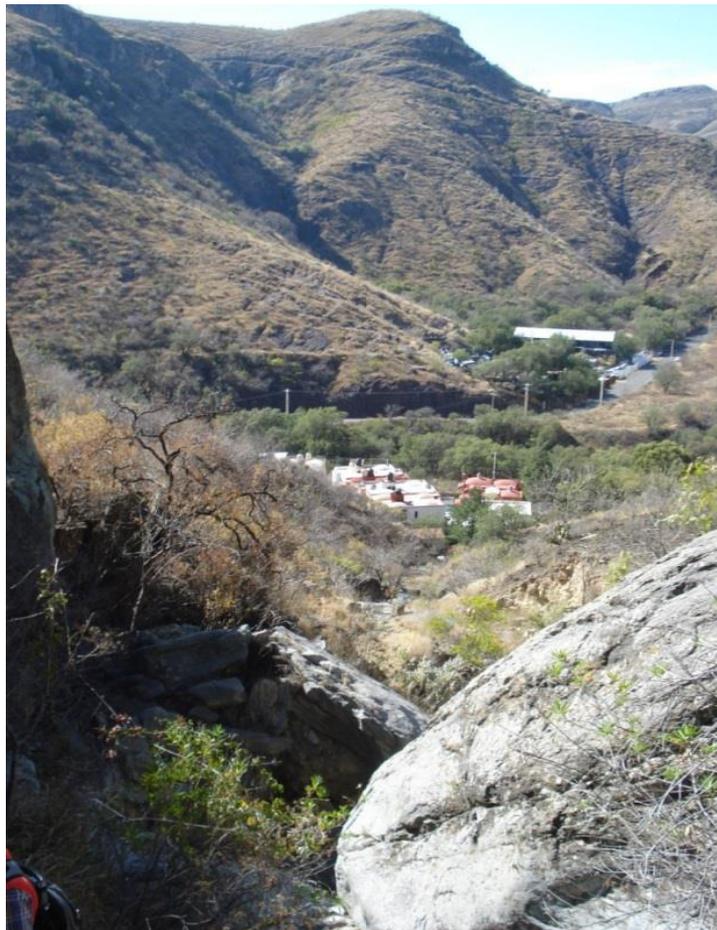
Pendientes muy pronunciadas en el Cerro El Meco



Bloques de rocas desprendidos en la ladera E del Cerro El Meco. Las caras de algunos bloques presentan notoria exfoliación.



Panorama sobre la Colonia Peñolera. Fotografía tomada sobre el cauce del arroyo Peñolera. En primer término bloques de roca ya desprendidos sobre el cauce de dicho arroyo.



Rocas conocidas como “Las Ranas”. La primera fotografía muestra la posición de estas rocas en pronunciada pendiente. La segunda imagen es un acercamiento donde se observa el fracturamiento.



Agentes de intemperización de los bloques de rocas. Son principalmente la humedad y la acción mecánica de las raíces de los vegetales. En la primera fotografía se aprecia la caolinización de los feldespatos presentes en la roca por efectos del agua, lo cual provoca la desintegración continua de los materiales. En la segunda fotografía se observa la acción mecánica de las raíces de los vegetales sobre la roca, produciéndose desprendimiento y fracturamiento.

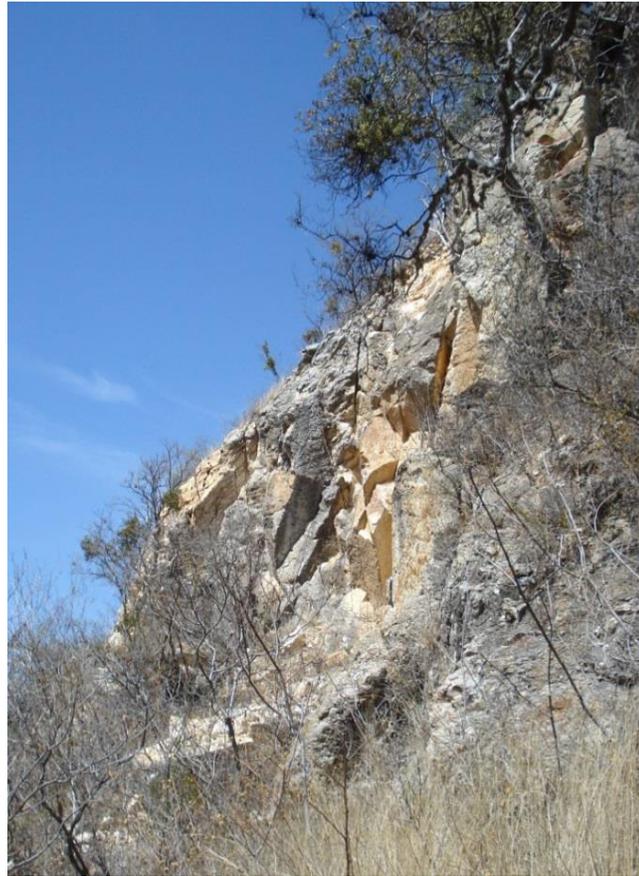


Presencia de agrietamiento. Fotografía tomada desde la cima del Cerro El Meco hacia la ladera izquierda del cerro de sirena. Se aprecia un agrietamiento en dirección NW-SE; este fenómeno favorece el movimiento de los materiales.



Bloques de roca en caída libre. Fotografía que muestra, a la izquierda, los bloques de roca desprendidos en inminente caída sobre el camino que lleva al Mineral de Peñafiel (derecha).

Bloque de rocas con evidente fracturamiento y exfoliación. Una vista más cercana de las rocas notoriamente fracturadas y exfoliadas en riesgo de caída sobre el camino hacia el Mineral de Peñafiel.



Desprendimiento y caída de rocas. Fotografía tomada desde el camino hacia la comunidad de peñafiel donde se observa un deslizamiento de rocas hacia el arroyo llamado Las Palomas.

IV.3.- Presas de Jales activas e inactivas.

Desde siempre, la explotación minera ha sido el origen de diversos problemas ambientales. Los desechos de las minas, terreros y jales representan una fuente importante de contaminación, mayormente los segundos.

De acuerdo al Glosario de Términos Mineros, un *jal* es un depósito de materiales de desperdicio (lodos y lamas) provenientes de una planta de beneficio⁷ (Figura IV.3). El origen de la palabra es incierto, aunque aparentemente es de origen persa o turco donde Jale (Jaleh o Zaleh) es un nombre femenino muy común.

Desde su descubrimiento en 1538 hasta que se construyó la primera presa de jales en 1934, en el Distrito Minero de Guanajuato los residuos de la minería habían sido vertidos en cañadas y arroyos, pero esencialmente sobre el cauce del Río Guanajuato; se han enlistado más de 30 sitios de confinamiento de ese tipo de materiales (Figura IV.4).

En las postrimerías del siglo pasado y albores del presente se despertó el interés por estudiar los jales del Distrito Minero de Guanajuato, considerando que este tipo de materiales es una importante fuente de contaminación ambiental.

Carrillo-Chávez, et al. (2003) realizaron un estudio geoquímico en el Distrito enfocado a la detección de metales pesados (Fe, Mn, Zn, As y Se) en el agua subterránea, provenientes de algunos jales de la región (Monte de San Nicolás, Valenciana, Noria Alta y La Luz) (Figura IV.5). Concluyeron que los materiales estudiados tienen un bajo potencial para generar acidez y dispersión de metales pesados en el ambiente.⁸ Más de una década atrás, en 1991, Ramos–Ramírez había realizado el estudio mineralógico de algunos de esos jales.⁹

⁷ Términos Mineros Mexicanos (1981) *Glosario de Términos Mineros Comunes*, Departamento de Minas de la Universidad de Sonora, México, p. 310.

⁸ Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida E., Rivas- Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales P., Cienfuegos, E. (2003) *Environmental Geochemistry of the Guanajuato Mining District, México*, Ore Geology Reviews, 23, 277-297.

⁹ Ramos-Ramírez, E. (1991) *Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos*, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, Tesis de maestría, 126 p.

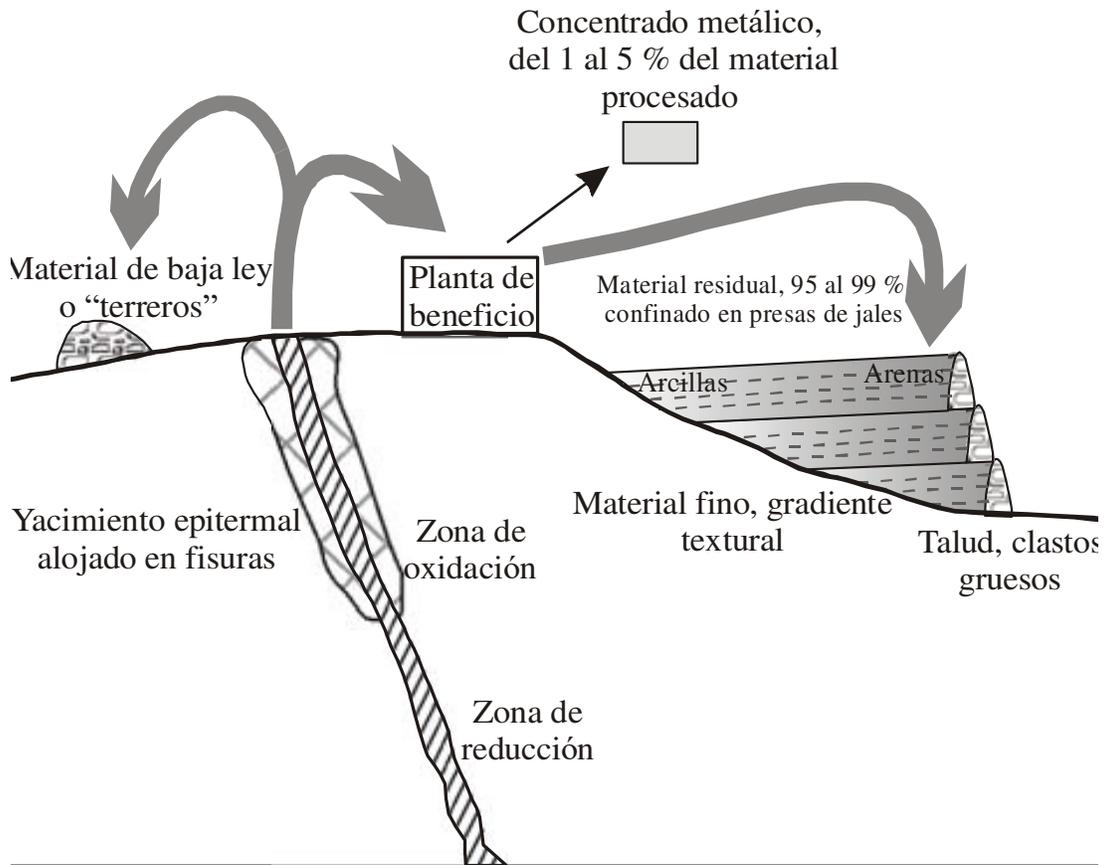


Figura IV.3 Esquema que muestra los depósitos de los materiales desechados en la explotación de una mina.¹⁰

¹⁰ Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C. D. (2004) *Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 21, núm. 2, p. 270.

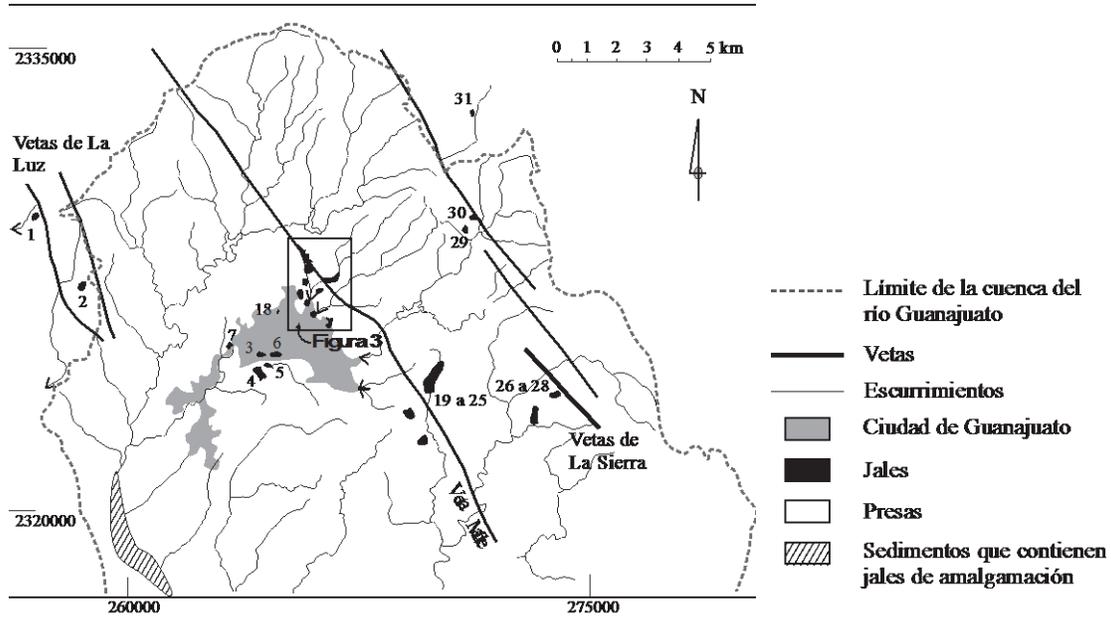


Figura IV.4 Ubicación de 31 jales principales en el Distrito Minero de Guanajuato.¹¹

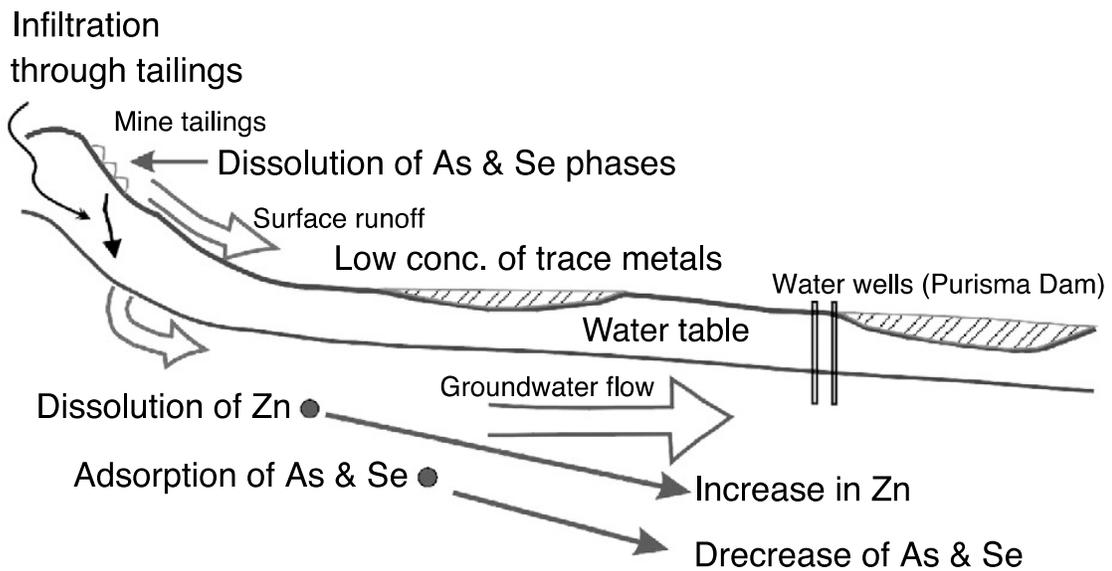


Figura IV.5 Esquema de los procesos químicos que tienen lugar en la superficie y en el subsuelo del área del Distrito Minero de Guanajuato.¹²

¹¹ Ramos-Arroyo, Y. y Siebe-Grabach, C. (2006) *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un Distrito Minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato*, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, núm. 1, p. 60.

¹² Carrillo-Chávez, A., et al. (2003) *op. cit.* p. 295.

En 2004 Ramos-Arroyo, et al. publican un artículo sobre los posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros del Distrito. Concluyen que los jales que tienen un origen en los yacimientos más profundos son los de mayor potencial de aportar acidez y elementos tóxicos al ambiente.¹³ Un año antes, en 2003, García-Meza había realizado la caracterización fisicoquímica del jal La Valenciana enfocado a la generación de propuestas para su remediación.¹⁴

En 2006 Mendoza-Amézquita, et al. estudian la lixiviación de los residuos de las minas La Asunción (inactiva) y Las Torres (activa) con la finalidad de evaluar la movilidad de los elementos zinc, cobre, plomo, cadmio, selenio y arsénico. Concluyeron que en esos sitios no existen las condiciones geoquímicas para la lixiviación de esos metales.¹⁵ Al mismo tiempo, también en el 2006, Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach publicaron un trabajo sobre una estrategia que desarrollaron para identificar los jales con potencial de riesgo ambiental del Distrito Minero de Guanajuato (Figura IV.6).¹⁶

¹³ Ramos-Arroyo, Y.R., et al. (2004) *op. cit.*, p. 282.

¹⁴ García-Meza J.V. (2003) *Caracterización fisicoquímica del desecho minero (jal) La Valenciana, Guanajuato, previa y posterior a bioensayos diagnósticos enfocados a la generación de propuestas para su remediación*, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 154 p.

¹⁵ Mendoza-Amézquita, E, Armienta-Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A. y Ramos-Ramírez, E. (2006) *Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, núm. 1, p.81.

¹⁶ Ramos-Arroyo, Y. y Siebe-Grabach, C. (2006) *op. cit.*, pp. 54-74.

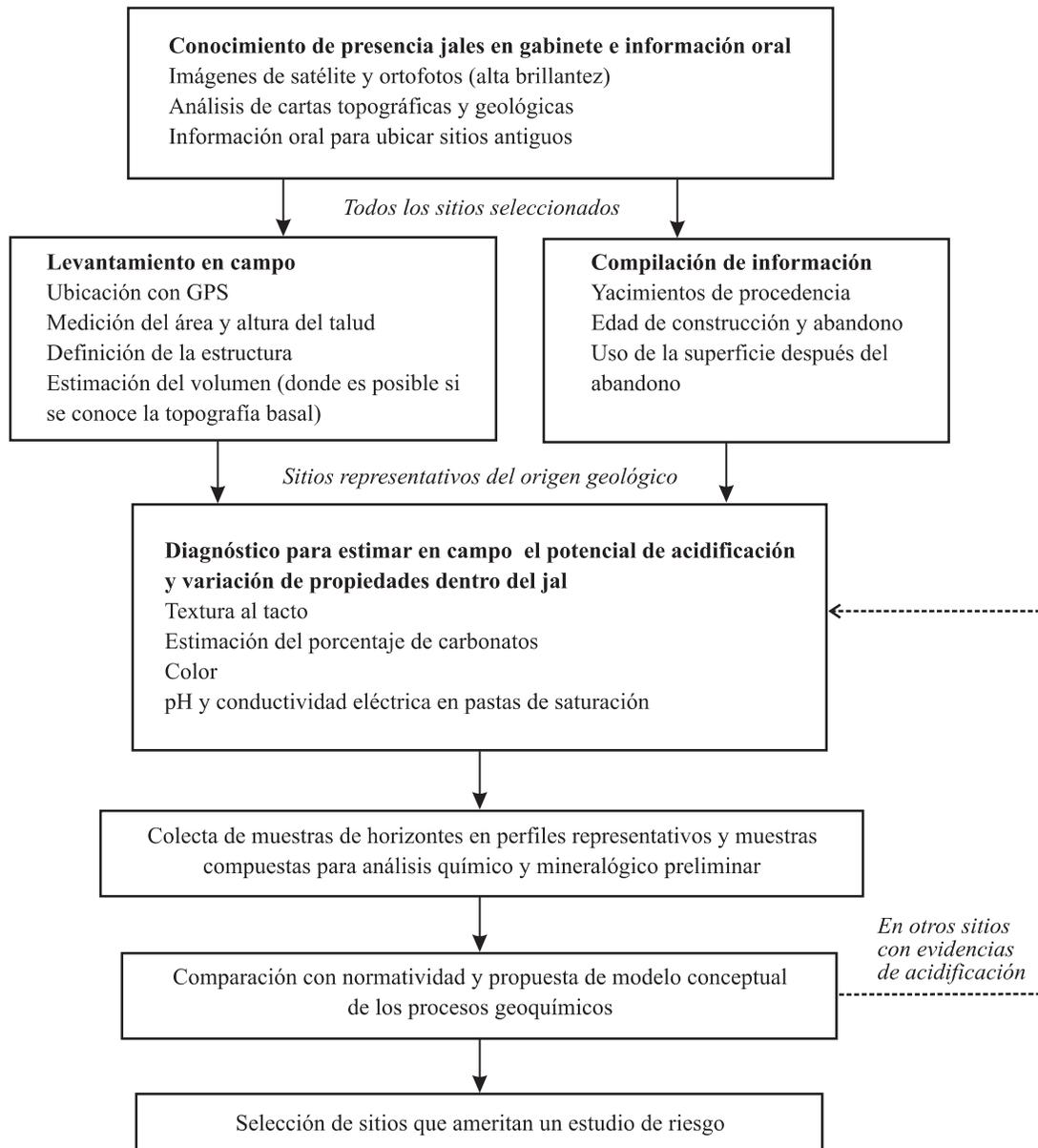


Figura IV.6 Estrategia general desarrollada por Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach en 2006 para seleccionar los jales que representan un mayor riesgo de acidificación y liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) al ambiente en el Distrito Minero de Guanajuato.¹⁷

¹⁷ Íbidem, p. 57.

En el área de estudio existen numerosos jales (Figura IV.7). La mayoría están en desuso y han sido abandonados, pero algunos de ellos han sido utilizados para la construcción de infraestructura principalmente como espacios de recreación o deportivas, con las debidas medidas de estabilización. Este es el caso de los jales Valenciana 7 y Valenciana 8 en el cauce del arroyo de Española, sobre los cuales se construyeron canchas deportivas.

Solamente un jal es utilizado actualmente: el Jolula A. Está sobrepuesto al jal Jolula, en desuso, aguas arriba del arroyo Jolula (Figura IV.8). El arroyo Española y el arroyo Jolula se unen en Cata para formar una sola corriente que atraviesa la ciudad de Guanajuato para desembocar en el río Guanajuato.

Como se ha mencionado, algunos de los jales del Distrito Minero de Guanajuato han sido estudiados con el propósito de conocer su potencial contaminante, pero hasta ahora se ha desdeñado el riesgo que representan como agentes destructores cuando se convierten en flujos de lodo. Un ejemplo cercano en el espacio y en el tiempo es la catástrofe sucedida en el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua cuando el 27 de Mayo de 1937 las intensas lluvias propiciaron que los jales formaran un enorme flujo de lodo que causó al menos 300 muertos y severo destrucción en los bienes públicos y privados de la población.¹⁸

El hecho de mencionar en este capítulo la presencia de jales en el área de estudio obedece a que estos materiales representan siempre un riesgo para la población y, en el caso de la ciudad de Guanajuato hasta un peligro todavía no valorado. Por esta razón no está de más un llamar la atención de la necesidad impostergable de analizar las condiciones que en ese sentido guardan los jales de la ciudad.

¹⁸ Macías, J.L., Corona-Chávez, P., Sánchez-Núñez, J.M., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V.H., Capra, L., García Tenorio, F. and Cisneros-Máximo, G. (2015) *The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacán, Mexico*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, pp. 1069-1085.

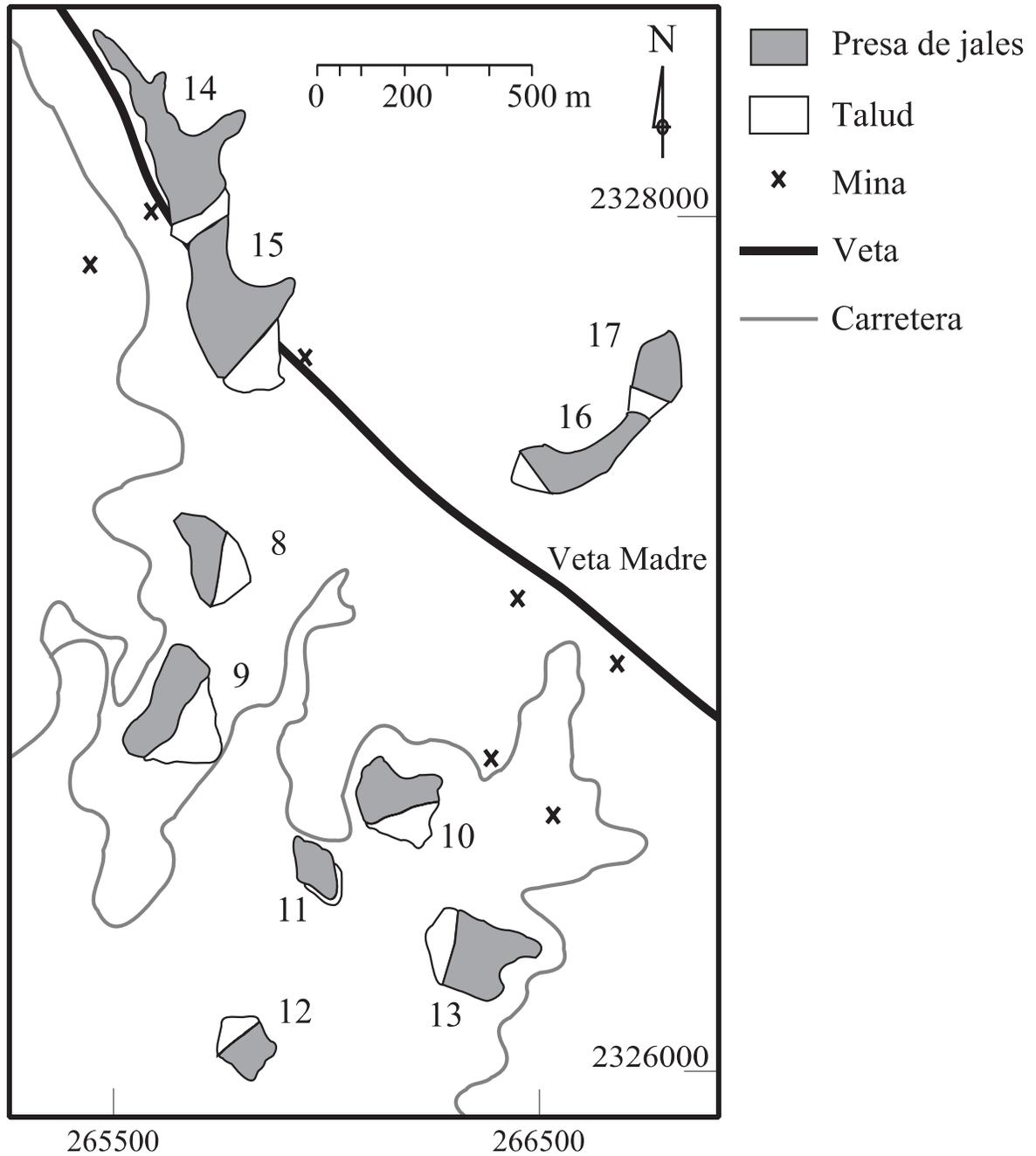


Figura IV.7 Localización de los sitios de Presas de Jales en el Área de Estudio: 8: Cata, 9: Presa 2, 10: Rayas, 11: Barrio Nuevo, 12: Durán, 13: El Cuarto, 14: Valenciana 7, 15: Valenciana 8, 16: Jolula 9 y 17: Jolula A.¹⁹

¹⁹ Íbidem, p. 63.



Figura IV.8 Porción Centro-Este del área de estudio donde se localizan zonas de Presas de Jales. Sólo el Jal Jolula A se encuentra activo.

CONCLUSIONES

“¡Qué incomparables encuentro tus designios, Señor, qué inmenso es su conjunto! Si me pongo a contarlos son más que arena, si los doy por terminados, aún me quedas Tú”.

Salmo 138

V. CONCLUSIONES

Uno de las características más interesantes de la Geología es el hecho de que no puede estudiarse un aspecto de esta ciencia sin relación con otro, ya que todo está en correspondencia y los diferentes eventos se explican mutuamente. Así, en sentido amplio, la geología se hace con la Geología.

En un intento de homogeneizar la información generada sobre los diferentes tipos de rocas que se presentan en la zona de estudio, en este trabajo se revisó y analizó lo reportado en la bibliografía, lo más exhaustivamente posible para conocer el desarrollo del conocimiento generado por unificar tanto las características de las formaciones como su nomenclatura, desde las primeras propuestas hasta el término de este trabajo.

En este aspecto, para las formaciones litológicas del Mesozoico se conservaron las designaciones ya reportadas, esto es, *Complejo Filoniano Santa Ana* y *Formación Esperanza*; sin embargo, para algunas formaciones Cenozoicas, no se utilizaron los nombres clásicos sino los correspondientes al tipo de roca, por ejemplo, *Conglomerado Guanajuato*, en lugar de Formación Guanajuato; *Ignimbrita Bufo* en lugar de Riolita; *Ignimbrita Calderones* y no Formación o Conglomerado o Arenisca; y *Andesita Cedro*, en lugar de Formación.

Para la *Formación Losero*, sin embargo, se conservó su designación debido a que, aun cuando desde las primeras descripciones se le ha dado el término *arenisca*, considerando su origen, que es volcánico, podría suscitar confusiones. Por tanto, aún existen muchas controversias en su designación probablemente por falta de apego al Código Estratigráfico Norteamericano.

El resultado más relevante de este trabajo fue la generación de una Carta Geológica a una escala 1:5,000 de la zona comprendida entre las Comunidades de Santa Ana y Peñafiel del Distrito Minero de Guanajuato, abarcando un área aproximada de 15 km². Aunque es una zona relativamente pequeña, por la escala del documento generado permite detallar y actualizar la información contenida en otras cartas, lo cual era uno de los principales objetivos de este trabajo.

Con relación a esta Carta Geológica, destacamos lo siguiente:

- (a) Las Cartas Geológicas de Martínez-Reyes de 1992 (a 1:100,000), Nieto-Samaniego de 1995 (a 1:50,000) y Geológico Minera Guanajuato del Servicio Geológico Mexicano de 1998 (a 1:50,000) se utilizaron como referencia, ya que las escalas no permiten cartografiar todos los detalles de la zona de estudio.
- (b) Las rocas cartografiadas como *Diorita La Luz* en las Cartas Esperanza y Guanajuato (escala 1:10,000) de la obra de Echegoyén, et al. (1970), corresponden en realidad al Complejo Filoniano Santa Ana hacia el NW y a las lavas de la Formación Esperanza, intercaladas con los sedimentos de lutitas y calizas, en toda la parte E de la Veta Madre. La Diorita La Luz es reportada por estos autores como una de las rocas intrusivas terciarias, junto con los intrusivos Mata, Peregrina, Cedro y Chichíndaro.¹
- (c) La Falla La Aldana pone en contacto tectónico al Complejo Filoniano, más antiguo, con el Conglomerado Guanajuato, más reciente. La falla de la Veta Madre es límite tectónico entre el Complejo Filoniano, más antiguo, con las rocas de la Formación Esperanza, más reciente. Posiblemente esta disposición de las formaciones observada por Echegoyén, et al. (1970), les permitió deducir que la Diorita La Luz era un intrusivo terciario y no una roca de más antigüedad, la cual se considera ahora que cabalgó por la tectónica de compresión generada en el Mesozoico y que estratigráficamente se ubicó sobre las formaciones más recientes.
- (d) Las rocas reconocidas como Formación La Luz (“rocas verdes”), sólo afloran en el área de estudio en algunas zonas cercanas a la Veta La Aldana, al W de la comunidad de La Valenciana. Y sus características litológicas no se asemejan a las lavas observadas en la zona de la Presa La Esperanza (ver Figuras II.5, II.8, II.9 y II.17), por lo que se trata de diferente tipo de formación.

¹ Echegoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, p. 16.

-
- (e) En las mismas Cartas a que nos referimos, probablemente por la escala, no fueron cartografiadas las calizas de la Formación Esperanza, las cuales están ampliamente distribuidas en toda la zona, y como se dijo, imparten a la superficie un color blanco muy notorio. (ver Figura II.10).
 - (f) En general, la falla de la Veta Madre pone en contacto tectónico las rocas Mesozoicas con las rocas Cenozoicas: la Formación Esperanza, más antigua, con el Conglomerado Guanajuato y las Ignimbritas Bufa y Calderones, todas más recientes.
 - (g) En la Carta se registra una zona de riesgos geológicos importantes, la cual comprende el área del Cerro El Meco y la carretera de acceso a Peñafiel-Monte San Nicolás, al S-SE de dicha Carta.

Por otro lado, consideramos importante destacar que aun cuando los sistemas de información geográfica y diferentes programas de cómputo (*software*) que ordinariamente se aplican para manejar la información geológica sean una fuerte herramienta para obtener las cartas, se considera que nunca podrán sustituir al trabajo que se realiza físicamente en gabinete, y por supuesto, en campo.

Con relación a los riesgos geológicos, es importante comentar que no se encontraron tesis profesionales que consideren este aspecto, sólo lo reportado por la Dirección de Protección Civil de la Secretaría de Seguridad Pública del Gobierno del Estado. La urgencia de alertar a la comunidad de estos peligros, requiere tanto de estudios más completos como, sobre todo, de programas de difusión más apropiados que concienticen a la sociedad. Además, si es prácticamente imposible desalojar las áreas habitacionales en riesgo, sí se podrían establecer medidas preventivas adecuadas y periódicas para contrarrestarlo y cuidar darles seguimiento.

Finalmente, en espera de que la información generada en este trabajo, en específico la Carta Geológica, pueda ser útil para próximos estudios, es importante comentar que el desarrollo y realización de esta tesis contribuyó significativamente en nuestro aprendizaje y formación académica en esta área de las Ciencias de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

Libros y artículos científicos consultados

Álvarez-Maya, V.M. (1997) *Comportamiento de la Veta Madre en el Basamento Mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato*, Trabajo de Diplomado en Especialista en Geología Económica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí, 62 p.

Antúnez Echagaray., F. (1964) *Monografía Histórico-Minera sobre el Distrito de Guanajuato*, Comisión de Recursos Naturales No Renovables, Publicación 17E, 258 pp.

Aranda-Gómez, J.J., Dávila-Harris, P., Vassallo-Morales, L.F., Godchaux, M., Bonnischsen, B., Martínez-Reyes, J., Ortega-Rivera, M.A. (2012) *Geology and tectonics of the southeastern portion of the Sierra de Guanajuato*, The Geological Society of America, Field Guide 25, pp. 135-162.

Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida E., Rivas- Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales P., Cienfuegos, E. (2003) *Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, México*, Ore Geology Reviews, 23, 277-297.

Consejo de Recursos Minerales (1992) *Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato*, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Secretaría de Minas e Industria Básica, México, 136 p. 4 Láminas.

Echegoyén S., J., Romero M., S. y Velázquez S., S. (1970) *Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75, 36 p., 4 hojas de cartas geológicas.

Freydier , C., Lapierre, H., Ruiz, J., Tardy, M., Martínez-R., J., Coulone, C. (2000) *The Early Cretaceous Arperos basin: an oceanic domain dividing the Guerrero arc from nuclear Mexico evidenced by the geochemistry of the lavas and sediments*, Journal of South American Earth Sciences 13, 325-336.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005) *Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, núm. 3, pp. 227-283.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004) *Ingeniería Geológica*, Pearson- Prentice Hall, España, 715 p.

Gross, W.H. (1975) *New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, México*, *Economic Geology*, 70, pp. 1175–1189 (resumen).

Keppie, J. Duncan (2004) *Terranes of Mexico: A 1.3 Billion Year Odysee*, Instituto de Geología, *International Geology Review*, V.H. Winston and Sons, Inc. vol. 46, p. 765-794.

Macías, J.L., Corona-Chávez, P., Sánchez-Núñez, J.M., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V.H., Capra, L., García Tenorio, F. and Cisneros-Máximo, G. (2015) *The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahuá, Michoacán, Mexico*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, pp. 1069-1085.

Martínez-Reyes, J. (2000) *Geología de la Cuenca del Río Guanajuato*, Universidad de Guanajuato-Instituto de Geología de la UNAM, 33 p.

Martínez-Reyes, J. (1987) *Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato*, en Instituto de Geología (editor) *Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra de Guanajuato*, 40, 50-91.

Martínez-Reyes, J. (1992) *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato* escala 1:100,000, con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Serie de Cartas Geológicas y Mineras, 8, México, D.F., 1 mapa con texto.

Martínez-Reyes, J.J., Camprubí, A., Uysal, I.T., Iriondo, A. (2015) *Geochronology of Mexican mineral deposits. II: Veta Madre and Sierra epithermal vein systems, Guanajuato district*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen 67, núm. 2, p. 349-355.

Mendoza-Amézquita, E, Armienta-Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A. y Ramos-Ramírez, E. (2006) *Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México*, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1, pp. 75-83.

Mengelle-López, J.J., Canet, C, Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Camprubí, A. (2013) *Secuencia vulcano-sedimentaria La Esperanza (Cretácico Inferior) al norte de Guanajuato, México: Importancia en la exploración de sulfuros masivos vulcanogénicos*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen 65, núm. 3, p. 511-525.

Monod, O., Lapierre, H., Chiodi, M., Martínez R., J, Calvet, P., Ortiz, E., Zimmermann, J.L. (1990) *Reconstitution d'un arc insulaire intra-océanique au Mexique central: la séquence volcano-plutonique de Guanajuato (Crétacé inférieur)*, C.R. Acade. Sci. Paris, t. 310, Série II, pp. 45-51.

Morán Zenteno, D. (sin año) *Geología de la República Mexicana*, INEGI-Universidad Nacional Autónoma de México, 88 p.

Nieto-Samaniego, A.F. 1990(1992) *Fallamiento y Estratigrafía Cenozoicos en la parte Sudoriental de la Sierra de Guanajuato*, Revista del Inst. de Geología, UNAM, vol. 9, núm. 2, p. 146-155.

Omaña, L., Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J. (2015) *Berriasian–early Valanginian calcareous shallow-water facies from the Arperos Basin: A proposal from the foraminiferal assemblage of the clasts of the Guanajuato Conglomerate, central Mexico* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volume 67, núm. 1, p. 45-57.

Orozco, Rafael (1921) *La Industria Minera de México. Distrito de Guanajuato*, Secretaría de Industria, Comercio y Trabajo, Secretaría de Educación Pública, 174 pp

Ortiz-Hernández, L.E. y Martínez-Reyes, J. (1993) *Geological Structure, Petrological and Geochemical Constraints for the centralmost segment of the Guerrero Terrane (Sierra of Guanajuato, Central Mexico)*, First Circum-Pacific and Circum Atlantic Terrane Conference, Guide Book C, Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México, Guanajuato, Gto., México.

Ortiz-Hernández, L.E., Chiodi, M. Lapierre, H., Monod, O. y Calvet, P. (1990; 1992) *El Arco Intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato-Características Petrográficas, Geoquímicas, Estructurales e Isotópicas del Complejo Filoniano y de las Lavas Basálticas asociadas; Implicaciones geodinámicas*, Revista del Instituto de Geología de la UNAM, vol. 9, núm. 2, p. 126-145.

Puy y Alquiza, M.J. y Miranda Avilés, R. (Coordinadores) (2012) *Patrimonio Geológico del Estado de Guanajuato*, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Departamento de Minas, Metalurgia y Geología, 164 p.

Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Ana-Zanor, G., Salazar-Hernández, M.M., Salazar-Hernández, M.C. (2015) *Cenozoic seismites and soft-sediment deformation structures in the Losero Formation, southern Sierra de Guanajuato, Mexico*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 32, núm. 2, p. 203-218.

Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Cruz-Cruz, M., Pérez-Arbizu, O., Vega-González, M., Ana-Zanor, G. (2014) *Geochemistry and Depositional Environment of the Losero Formation in the Mesa Central, México*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 66, núm 3, p. 413-430.

Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C. D. (2004) *Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 21, núm. 2, p. 268-284.

Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D. (2006) *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un Distrito Minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, núm. 1, pp. 54-74.

Sandoval, Mario (2010) *Informe de Evaluación de Peligros Geológicos en el Cerro de La Bufa en el municipio de Guanajuato, Gto.*, Unidad Técnica, Coordinación Estatal de Protección Civil, Secretaría de Seguridad Pública del Estado de Guanajuato, 8 pp.

Servicio Geológico Mexicano (1998) *Carta Geológico-Minera Guanajuato F14-C43 Guanajuato*, Secretaría de Economía.

Servicio Geológico Mexicano (2007) *Texto explicativo de la Carta Geológica de México. Escala 1:2'000 000*, Secretaría de Economía, sexta edición.

Servicio Geológico Mexicano (2013) *Léxico Estratigráfico de México*, http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html

Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Obras Públicas y Secretaría de Seguridad Pública (2005) *Estudio de Peligros Geológicos de Localidades del Estado de Guanajuato, Cerro El Meco, Guanajuato, Gto.*, Convenio de Colaboración, 21 pp.

Términos Mineros Mexicanos (1981) *Glosario de Términos Mineros Comunes*, Departamento de Minas de la Universidad de Sonora, México, pp. 307-312.

Vasallo, L. F., Martínez-Reyes, J., Paris, J.P. (1996) *Estructuras Circulares y Lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México y su significado en la Prospección Minera*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 13, núm. 2, p. 252-257.

Tesis de Licenciatura y Doctorado consultadas

Campos Medina, Juan P. y Milanés Luna, Miriam E. (2014) *Cinemática del cabalgamiento y ventana tectónica de Santa Ana, Sierra de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Coutiño Taboada, Mariana E. (2015) *Correlación estratigráfica de las unidades del Terciario Medio del Distrito Minero de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

García-Meza J.V. (2003) *Caracterización fisicoquímica del desecho minero (jal) La Valenciana, Guanajuato, previa y posterior a bioensayos diagnósticos enfocados a la generación de propuestas para su remediación*, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 154 p.

Gómez Mosqueda, Victoria (2012) *Propuesta de método de exploración para el Sistema de Vetas de La Luz*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Juárez Mendoza, Rogelio (2011) *Estudio de Litofacies de la Formación Losero de la ciudad de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Martínez Alfaro, Martha D. (2013) *Caracterización del material pétreo de la Formación Losero para uso en la restauración y construcción de monumentos en la ciudad de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Nieto-Samaniego, A.F. (1985) *Geología de un Área de 237 km² al Norte de Guanajuato, Gto.*, Tesis profesional Ingeniero Geólogo, Facultad de Minas, Universidad de Guanajuato.

Orozco-Villaseñor, F.J. (2014) *Mineralogía y génesis del “clavo de Rayas” de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato*, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, UNAM, 240 p.

Ramos-Ramírez, E. (1991) *Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos*, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, Tesis de maestría, 126 p.

Zavala Esquivel, Alejandra (2007) *Análisis de facies y reconstrucción paleoambiental del Conglomerado Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Documentos relacionados

Libros y artículos científicos

Camprubí, A. y Albinson, T. (2006) *Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 58, núm. 1, pp. 27-81.

Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M. y Talavera-Mendoza, O. (2008) *The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone*, The Geological Society of America, Special Paper 436, pp. 279-308.

Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M. (2000) *The Geologic Evolution of the Southern Sierra de Guanajuato, México: A Documented Example of the Transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt*, International Geology Reviews, volumen 42, pp. 131-151.

Hansen A., Francisco (sin año) *Cartografía Básica*, Dirección General de Geografía INEGI.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2005) *Guía para la Interpretación de Cartografía Geológica*, México, 26 p.

Keller, Edward A. y Blodgett, Robert H. (2007) *Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*, Pearson- Prentice Hall, España, 422 p.

Nieto-Samaniego, A.F., García-Dobarganes B., J.E., Aguirre-Maese, A.L. (1992) *Interpretación Estructural de los Rasgos Geomorfológicos Principales de la Sierra de Guanajuato*, Revista del Instituto de Geología, UNAM, volumen 10, núm. 1, p. 1-5.

Nieto-Samaniego, A.F., Alanis-Álvarez, S.A., Camprubí-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, p. 285-318.

Orozco-Villaseñor, F.J. y González-Partida, E. (2014) *La Historia de la Minería Mexicana: El Caso del Distrito Minero de Guanajuato, Gto. México*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y Centro de Geociencias-UNAM, México. 33 p.

Ortiz Hernández, L.E. (2000) *An arc ankaramite occurrence in central Mexico*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 17, núm. 1, pp. 34-44.

Ortiz Hernández, L.E., Acevedo Sandoval, O.A. y Flores Castro, K. (2003) *Early Cretaceous intraplate seamounts from Guanajuato, central Mexico: geochemical and mineralogical data*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 20, núm. 1, p. 27-40.

Puy-Alquiza, M. J., Miranda-Avilés, R., Caudillo-González, M. (2010) *Propuesta de puntos de interés geológico y minero en el Área Natural Protegida El Orito. Distrito Minero de Guanajuato, México*, Revista de Turismo y Patrimonio Cultural, volumen 8, núm. 4, p. 595-607.

Ramos-Arroyo, Y.R. y Siebe-Grabach, C. D. (2006) *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 23, núm. 1, p. 54-74.

Rigol-Sánchez, J., Chica-Olmo, M., Pardo-Igúzquiza, E., Rodríguez-Galiano, V. y Chica-Rivas, M. (2011) *Análisis e integración de datos espaciales en investigación de recursos geológicos mediante Sistemas de Información Geográfica*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 63, núm. 1, p. 61-70.

Servicio Geológico Mexicano (2014) *Panorama Minero del Estado de Guanajuato*, Secretaría de Economía, 51 p.

Shunshan, X., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Grajales-Nishimura, J.M. (2008), *Evolution of the geometry of normal faults in the Oligocene volcanic field of the Mesa Central, Mexico*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen 60, núm. 1, pp. 71-82.

Trejoluna-Puente, O. y Tritiño-Torralba, L. “*Los Pueblos Mineros*” *oportunidad para el desarrollo sustentable del patrimonio minero. Estado de Guanajuato. México*. Procesos sociales y económicos, y territoriales en América Latina: actores, escalas. p. 1643-1643.

Libros y artículos científicos mencionados por otros autores (no consultados)

Aranda-Gómez, J.J., and McDowell, F.W. (1998) *Paleogene extension in the southern Basin and Range Province of Mexico: Syn-depositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District*, International Geology Review, v. 40, no. 2, p. 116–134.

Bostford, C.W. (1909) *The Zacatecas District and its relation to Guanajuato and Other Camps*, Eng. And Min. Jour, vol. 87.

Buchanan, L.J. (1979) *The Las Torres mine, Guanajuato, México; Ore controls of a fossil geothermal system*, Colorado, Colorado School of Mines, Tesis Doctoral, 138 p.

Cepeda-Dávila, L.J. (1967) *Estudio petrológico y mineralógico de la región "El Cubo", Mpio. de Guanajuato, Gto.*, Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 19, números 7-12, Julio/Diciembre, p. 39-107.

Chiodi, M., Monod, O., Busnardo, R., Gaspard, D., Sánchez, A., Yta, M. (1988) *Une discordance ante-albienne datée par une faune d'ammonites et de brachiopodes de type téthysien au Mexique central*, Geobios, v. 21, pp. 125-135.

Corona-Chávez, P. (1988) *Análisis estratigráfico estructural de la porción centro-sur de la Sierra de Guanajuato*, México: México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis de licenciatura, 60 p

Dávila-Alcocer, V.M. and Martínez-Reyes, J. (1987) *Una edad cretácica para las rocas basales de la Sierra de Guanajuato*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, resúmenes, p.19–20.

Edwards, D.J. (1956) *Estudios acerca de algunos de los conglomerados rojos del Terciario Inferior del centro de México*, Congreso Geológico Internacional, 20, México, D.F., Memoria.

Fries, C., Jr., Hibbard, C.W., and Dunkle, D.H. (1955) *Early Cenozoic vertebrates in the red conglomerate at Guanajuato, Mexico*, Smithsonian Miscellaneous Collection v. 123, no. 7, p. 25.

Guiza, R., Rendón-C. y Baltierra-G., J.J. (1949) *Estudio Geológico del Distrito Minero de Guanajuato, Gto (zona de la Veta Madre)*, Instituto Nacional de Investigaciones de Recursos Minerales, Bol. 22, 75 p.

-
- Labarthe-H., G. *et al.* (1995) *Cartografía Geológica 1:25,000 de la Sierra de Guanajuato*, Informe privado para la Compañía Minera Las Torres, 128 p. 145.
- Labarthe-H., G. *et al.* (1995) *Cartografía Geológica 1:10,000 de la Sierra de Guanajuato*, In-forme privado para la Compañía Minera Las Torres, 128 p.
- Lapierre, H., Ortiz-Hernández, L.E., Abouchami, W., Monod, O., Coulon, Ch., Zimmermann, J.L. (1992) *A crustal section of an intra-oceanic island arc: The late Jurassic-Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence, central Mexico*, Earth and Planetary Science Letters, 108, 61-77.
- Mango, H. (1992) *Origin of Epithermal Ag-Au-Cu-Pb-Zn mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, Mexico*, Unpublished Ph. D. dissertation, Dartmouth College, Hanover, NH, pp 200.
- Martínez-Reyes, J. (1987) *Resumen de la Geología y excursión a la Sierra de Guanajuato*, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la Geología de la región de la Sierra de Guanajuato, Guanajuato, Gto. p. 50-91 (resumen y guía).
- Martínez-Reyes, J., Vassallo, L.F., Franco, I.F de J. (1995) *Geología y potencial minero de la porción central-poniente del Estado de Guanajuato*, Instituto de Geología, Estación regional centro y Secretaría de Desarrollo Económico de Guanajuato, Folleto de divulgación, 37 p.
- Martini, M., Mori, L., Solari, L., and Centeno-García, E. (2011) *Sandstone provenance of the Arperos Basin (Sierra de Guanajuato, central Mexico): Late Jurassic–Early Cretaceous back-arc spreading as the foundation of the Guerrero terrane*, The Journal of Geology, v. 119, p. 597–617.
- Meave, E. (1959) *Estudio Geológico Económico del Mineral de Santo Niño, Distrito Minero de Guanajuato*, Consejo de Recursos No Renovables, México.
- Monroy, L. (1888) *Minas de Guanajuato*, Anales del Ministerio de Fomento de la República Mexicana, Tomo X, Secretaría de Fomento, México.
- Monod, O., Lapierre, H., Choidi, M., Martínez-Reyes, J., Calvet, P., Ortiz-Hernández, L.E., Zimmermann, J.L., 1990, *Reconstitution d'un arc insulaire intra-océanique au Mexique central: la séquence volcanoplutonique de Guanajuato (Crétacé inférieur)*, Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris), 310(2), 45-51.
- Quintero-Legorreta, O., 1992, *Geología de la Región de Comanja, Estados de Guanajuato y Jalisco*, Revista del Instituto de Geología, 10(1), 6-25.

Wandke, Alfred y Martínez, Juan (1928) *The Guanajuato Mining District, Guanajuato, México*, Econ. Geology, vol. 23, p. 1-44.

Tesis profesionales de licenciatura relacionadas (no consultadas)

Bustos Bautista, Norma A. (2014) *Variación textural y mineralógica (Proveniencia) de la Caliza La Perlita en la Localidad de Bernalejo*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Cendejas Méndez, Marina G. (2008) *Caracterización sedimentológica y geoquímica de los sedimentos de las terrazas fluviales del Río Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Cruz Cruz, Maricela (2013) *Caracterización petrográfica, geoquímica y estructuras primarias de la Formación Losero*, Guanajuato, México, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Flores Cruz, Yessica P. (2014) *Microfacies, análisis de variación textural y mineralógico en la secuencia transgresiva de la Caliza La Perlita en la Localidad Puerto Blanco, Gto.*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Guadiana Lares, Jorge (2010) *Análisis estructural del Distrito Minero de Guanajuato utilizando imagen satelital ASTER y aplicación del método McCoss*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Olvera Prado, Mayra A. (2013) *Cálculo de reservas utilizando software MINESIGHT del área denominada Guanajuatito, ubicada en Guanajuato, Gto. (Geología y Mineralización)*, Tesis Profesional Ingeniero de Minas, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Quintana Delgado, Juan A. (2013) *Análisis sedimentológico de las facies turbidíticas de la Caliza Perlita (Aptiano-Albiano) del NE de la Sierra de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Ramírez Hermosillo, Dolores A. (2009) *Evidencias de magmatismo poslaramídico en el Conglomerado Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

Verdín Muñoz, Rodrigo (2014) *Cartografía de la Caliza La Perlita en el NE de la Sierra de Guanajuato*, Tesis Profesional Ingeniero Geólogo, Departamento de Ing. en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

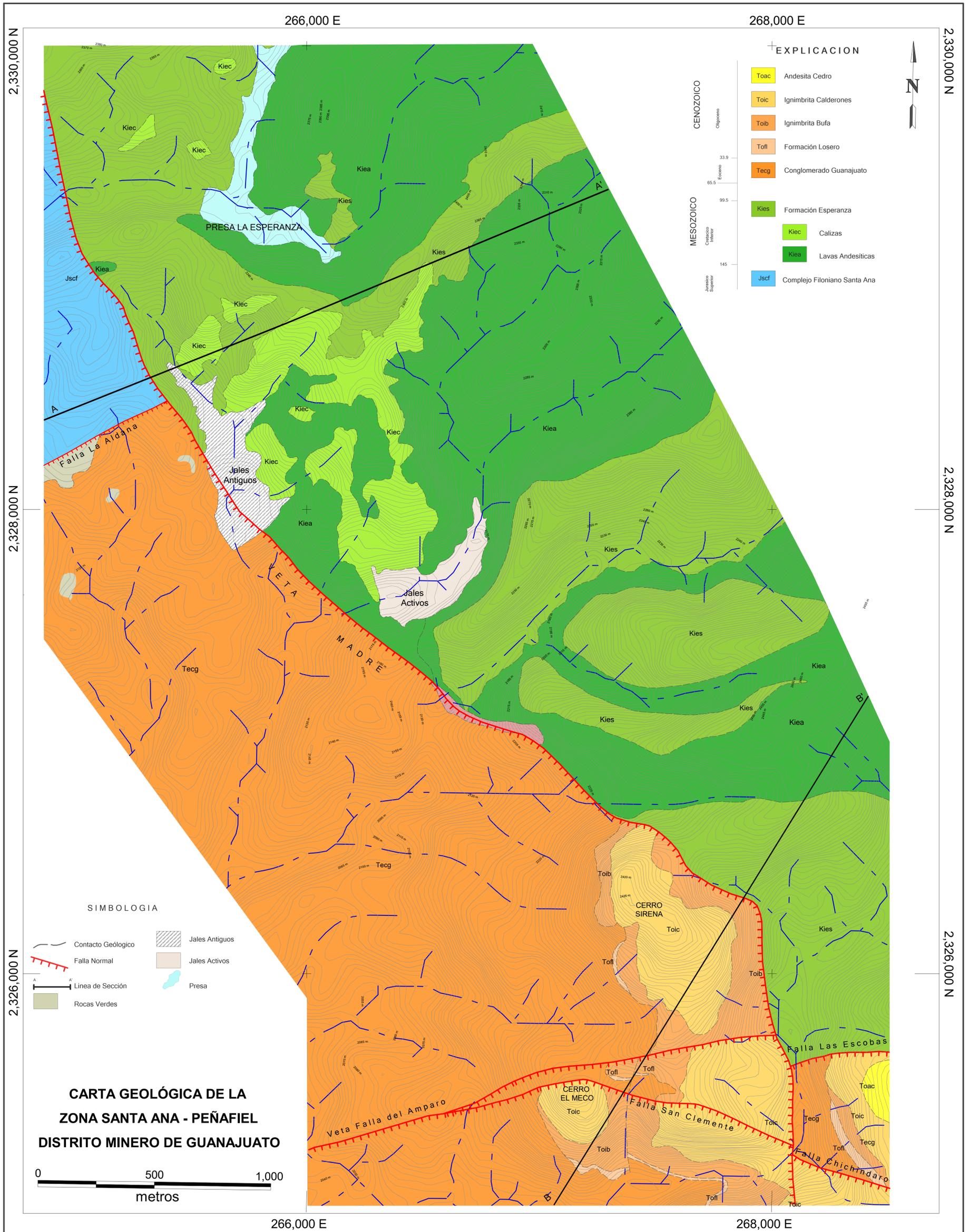
ÍNDICE DE FIGURAS

| FIGURAS | | página |
|---------------------|---|---------------|
| Figura I.1 | Localización geográfica del Área de Estudio en el marco del Estado de Guanajuato. | 3 |
| Figura I.2 | Localización geográfica del Área de Estudio en el marco de la Sierra de Guanajuato. | 3 |
| Figura I.3 | Localización del Área de Estudio en el marco de las provincias fisiográficas de la República Mexicana. | 5 |
| Figura I.4 | Localización del área de estudio en el marco de la geología de la República Mexicana. | 6 |
| Figura II.1 | Columnas estratigráficas de los conjuntos basales de la Sierra de Guanajuato: (a) Arco Guanajuato y (b) Formación Arperos. | 12 |
| Figura II.2 | Columna estratigráfica de la Zona de Estudio. | 15 |
| Figura II.3 | Afloramiento del Complejo Filoniano Santa Ana hacia la parte posterior de la Mina de Guadalupe, en los alrededores de la Comunidad de La Valenciana. | 17 |
| Figura II.4 | Contacto litológico Complejo Filoniano Santa Ana-Conglomerado Guanajuato. Localizado en el área aledaña al Patio de la Mina La Valenciana. | 19 |
| Figura II.5 | Contacto de Andesitas y Conglomerado Guanajuato. Carretera Guanajuato-La Valenciana, en el tramo CEDAJ II, parte posterior de la Mina Tepeyac. | 19 |
| Figura II.6 | Columna estratigráfica de la Formación Esperanza. | 22 |
| Figura II.7 | Afloramientos de la Formación Esperanza. (a) Sobre el Camino Presa La Esperanza hacia La Concepción. (b) En torno de la Bocamina San Ramón. | 23 |
| Figura II.8 | Afloramiento de lavas andesíticas mesozoicas. Camino de acceso a la Presa La Esperanza. | 24 |
| Figura II.9 | Afloramiento de lavas andesíticas mesozoicas. Camino de acceso hacia la comunidad de La Concepción. | 24 |
| Figura II.10 | Afloramiento de las Calizas de la Formación Esperanza. (a) Vista sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción. (b) Un acercamiento. | 25 |
| Figura II.11 | Panorama desde la Carretera Guanajuato-Dolores Hidalgo hacia la ciudad de Guanajuato. En primer plano Calizas de la Formación Esperanza. Al fondo del arroyo, jales antiguos, actualmente el CEDAJ II. | 26 |
| Figura II.12 | (a) Rocas de la Formación Esperanza. (b) Un acercamiento de las rocas de la Formación Esperanza, mostrando esquistosidad. Ambos afloramientos sobre la carretera Guanajuato-Dolores Hidalgo, a espaldas de la Presa La Esperanza. | 27 |
| Figura II.13 | Deformación de las rocas de la Formación Esperanza. (a) Plegamiento. (b) Basculamiento. Ambos afloramientos sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción. | 28 |
| Figura II.14 | Cuarzo de segregación en las rocas de la Formación Esperanza. Afloramientos sobre el camino hacia la comunidad de La Concepción. | 29 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura II.15 | Contacto estratigráfico Conglomerado Guanajuato – Formación Losero (fuera del área de estudio). | 33 |
| Figura II.16 | Afloramientos del Conglomerado Guanajuato. (a) Estratos masivos. Sobre la Carretera Panorámica tramo San Javier-Cata. (b) Estratos medianos. Sobre la Carretera Panorámica, a la altura de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato. | 34 |
| Figura II.17 | Afloramiento de la Formación Losero. Zona del Cerro de La Bufa (fuera de la zona de estudio). | 39 |
| Figura II.18 | Huellas de desecación en la Formación Losero. Zona del Cerro de La Bufa (fuera de la zona de estudio). | 40 |
| Figura II.19 | Afloramiento de la Ignimbrita Bufa. Camino Pastita –Mineral de Peñafiel. | 43 |
| Figura II.20 | Columna estratigráfica de la Ignimbrita Calderones. | 46 |
| Figura II.21 | Vetilleo sobre rocas de Ignimbrita Bufa. Localizado sobre la ladera este del Cerro El Meco. | 48 |
| Figura II.22 | Zona de contacto entre las formaciones Conglomerado Guanajuato-Ignimbrita Bufa-Formación Losero. Localizada en la parte superior del Cerro de El Meco, hacia su ladera Este. | 48 |
| Figura II.23 | Principales eventos tectónicos en el Distrito Minero de Guanajuato. | 51 |
| Figura II.24 | Registro de eventos de compresión en las rocas de la Formación Esperanza: cuarzo de segregación y microplegamiento. | 52 |
| Figura II.25 | Sistemas de Vetas del Distrito Minero de Guanajuato. | 54 |
| Figura II.26 | Vista del famoso reliz de la Veta Madre de Guanajuato desde la Mina de Rayas. | 56 |
| Figura II.27 | Esquemización del modelo de Buchanan. | 61 |
| Figura IV.1 | Porción Suroriental del área de estudio donde se localizan los sitios de inminentes deslizamientos de rocas. | 71 |
| Figura IV.2 | Estratigrafía del Cerro El Meco. Fotografía tomada desde el flanco SE. | 72 |
| Figura IV.3 | Esquema que muestra los depósitos de los materiales desechados en la explotación de una mina. | 81 |
| Figura IV.4 | Ubicación de 31 jales principales en el Distrito Minero de Guanajuato | 82 |
| Figura IV.5 | Esquema de los procesos químicos que tienen lugar en la superficie y en el subsuelo del área del Distrito Minero de Guanajuato. | 82 |
| Figura IV.6 | Estrategia general desarrollada por Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach en 2006 para seleccionar los jales que representan un mayor riesgo de acidificación y liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) al ambiente en el Distrito Minero de Guanajuato. | 84 |
| Figura IV.7 | Localización de los sitios de Presas de Jales en el Área de Estudio: 8: Cata, 9: Presa 2, 10: Rayas, 11: Barrio Nuevo, 12: Durán, 13: El Cuarto, 14: Valenciana 7, 15: Valenciana 8, 16: Jolula 9 y 17: Jolula A. | 86 |
| Figura IV.8 | Porción Centro-Este del área de estudio donde se localizan zonas de Presas de Jales. Sólo el Jal Jolula A se encuentra activo. | 87 |

ÍNDICE DE TABLAS

| TABLAS | | página |
|-------------------|---|---------------|
| Tabla I.1 | Relación de aportes al conocimiento geológico del Distrito Minero de Guanajuato. | 7 |
| Tabla I.1 | Relación de aportes al conocimiento geológico del Distrito Minero de Guanajuato (continuación). | 8 |
| Tabla II.1 | Interpretación litológica y origen de la Formación Losero reportada por varios autores. | 38 |
| Tabla II.2 | Fases de fallamiento Cenozoico en el Distrito Minero de Guanajuato. | 55 |



268,000 E

266,000 E

2,330,000 N

2,330,000 N

2,328,000 N

2,328,000 N

2,326,000 N

2,326,000 N

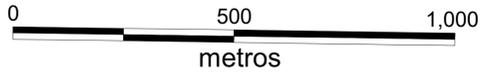
EXPLICACION

| CENOZOICO | |
|-------------------|-----------------------------------|
| Oligeno | Toac Andesita Cedro |
| | Toic Ignimbrita Calderones |
| | Toib Ignimbrita Bufo |
| | Tofl Formación Losero |
| | Tecg Conglomerado Guanajuato |
| MESOZOICO | |
| Chetico Inferior | Kies Formación Esperanza |
| | Kiec Calizas |
| | Kiea Lavas Andesticas |
| Jurásico Superior | Jscf Complejo Filoniano Santa Ana |

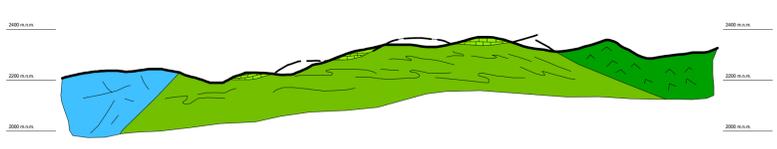
SIMBOLOGIA

| | | | |
|--|--------------------|--|----------------|
| | Contacto Geológico | | Jales Antiguos |
| | Falla Normal | | Jales Activos |
| | Línea de Sección | | Presa |
| | Rocas Verdes | | |

CARTA GEOLÓGICA DE LA ZONA SANTA ANA - PEÑAFIEL DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO



SECCIÓN A-A'



SECCIÓN B-B'

