



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL
Y CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO
ROCOSO DE LA ZONA DE LA VETA
6500**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Miriam Álvarez Anguiano

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

"...Pero el tiempo es vida, y la vida reside en el corazón..."

"Momo" , Michael Ende.

Dedicada a mis padres y a mis hermanas

Agradecimientos

A Dios por acompañarme en cada momento desde siempre, por las personas que ha puesto en mi vida y las oportunidades que me ha brindado en mi trayectoria universitaria.

A mis padres, Maricela y Agustín, por ser el motor de mi vida, por su esfuerzo, amor y apoyo incondicional que fueron de gran importancia para que éste logro fuera posible.

A mis hermanas, Mirsa y Tania, por brindarme su amor, alegría, apoyo y aliento en todo momento y estar en los buenos y malos momentos.

A la UNAM y la Facultad de Ingeniería, por todas las oportunidades y experiencias que me brindó, las cuales pude disfrutar y aprovechar al máximo, tanto en actividades académicas como deportivas, sin duda alguna me contribuyeron mucho a mi formación profesional y personal.

Al Dr. Moisés Dávila, por dirigir mi tesis, por ser un ejemplo a seguir como profesor y como persona, por sus enseñanzas no sólo en el área de geología sino también en inculcar con ejemplo la importancia de los valores.

A mis sinodales: Ing. José Santos, Ing. Gabriel Salinas, Ing. Javier Mancera y al Dr. Ricardo José Padilla, por su tiempo, apoyo y revisiones al presente trabajo para concluirlo satisfactoriamente.

A la comunidad DICT, sobre todo a mis profesores por su tiempo, dedicación y compartir su conocimiento que ayudaron a mi formación profesional; maestra Isabel estoy agradecida por su apoyo, orientación y escucharme siempre. Quiero agradecer de corazón al Dr. Enrique González, por la oportunidad que me ha dado de colaborar con él, que junto con Ana Nila y Andrea Salinas logramos hacer un buen equipo, he aprendido de ellos de geología y de su calidad como seres humanos. Igualmente agradezco al Dr. Padilla y al Ing. Gabriel Salinas, por su apoyo, confianza y permitirme ser su ayudante, ya que contribuyeron con nuevos aprendizajes e incrementó

el desarrollo de mis habilidades.

A la empresa Fresnillo que me dio la oportunidad de realizar dos estancias profesionales en la Unidad La Herradura y la Unidad Minera de Fresnillo, en esta última estoy agradecida sinceramente con los ingenieros Julián, Chava, Julio, Marco, Bruno y Fabián por su apoyo, paciencia, enseñanza y atenciones en el desarrollo del proyecto abordado en el presente trabajo. Asimismo, quiero expresar mi aprecio a los ingenieros del departamento de Geología, Planeación, Topografía, y Planta, al personal de GES y del sindicato con quienes tuve la oportunidad de conocer y convivir, adquiriendo nuevos conocimientos. A Dani, Gerardo y Ángel, gracias por ser los mejores roomies que pude tener el tiempo de mi estancia, por permitirme conocerlos y convertirse en mis amigos.

A Very, Julieta, Dámaris y Gaby, por demostrarme su amistad incondicional durante toda la carrera, por su apoyo, formar parte de aventuras, fiestas, viajes y ser mi equipo siempre, estoy muy agradecida de haberlas encontrado en mi camino.

Quiero agradecer de corazón a Estefania, Giss, Armin, Andy, Nancy, Jesús Abraham, Javi, Dani Barredo, Ray, David, Dani Espino, Marcelo, Diana Mireles, Mariana Patiño y a Daniela González porque siempre me demostraron con hechos que podía contar con ellos y tienen un gran significado en mi vida.

A mis amigos de la carrera, Paz, Yael, Stefy, Said, Erick el de la moto, Rodrigo Trejo, Gabo, Quique, Santi, Caro, Katy, Alana, Ángel, Memo, Marianito, Robinson, Daniela, Lalo, Benavides, Moss, Sotelo, Sinuhe, Fernanda, Mafer, Margarita, Marcos, Román, Martha, Ariadna, Wizkas, Gisselle, Mónica y Check, porque sin duda hicieron que mi estancia en la universidad y que las prácticas de campo fueran increíbles.

A mi Coach, César, por el apoyo y exigencia, no sólo en el deporte sino también en la carrera y brindarme su amistad, así como a mis amigos que gracias al basket tuve la oportunidad de conocer, convivir, crecer, fortalecer el significado del trabajo en equipo y compartir ser campeones en más de una ocasión: Idalia, Pao, Lore, Diana, Diana bebé, Esther, Lola, Iris, Yoz, Josselyn, Estefanía, Emiliano (Sebas), Pablo, Moi, Memo, Esteban, Paniagua y Alex.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que por diversas circunstancias pude conocer y me ofrecieron su apoyo en la Comisión Nacional de Hidrocarburos, el Servicio Geológico Mexicano, Moro Ingeniería, Asociación Geohidrológica Mexicana, Facultad de Ciencias de la Tierra (UANL) y el Instituto de Geología.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Resumen

Modelo Geológico-estructural y caracterización del macizo rocoso de la veta 6500

por **Miriam Álvarez Anguiano**

El Distrito Minero de Fresnillo, ubicado en el estado de Zacatecas, posee un yacimiento de tipo epitermal de gran interés, debido principalmente a la extracción de plata. El presente trabajo explica la metodología de mapeo y levantamiento geológico-estructural de la Veta 6500, ubicada en la zona oriente de la mina, en donde se siguió el procedimiento interno del departamento de geología para su estudio. Se hizo un mapeo de aproximadamente 200 m con cuyos datos recolectados de fallas y fracturas se realizó un análisis estructural para determinar el vector de esfuerzos principales que, en determinado momento del tiempo geológico, dieron origen a dichas discontinuidades. Asimismo, se caracterizó el macizo rocoso del área estudiada con base al RMR de Bieniawski (1989), con la finalidad de dar una recomendación geotécnica para la estabilidad de la obra en desarrollo. Por otra parte, se crearon dos modelos utilizando el software Leapfrog Geo a partir de la base de datos de 28 barrenos de exploración exportados del programa DH Loguer. El primer modelo obtenido fue el geológico, donde se definieron los límites litológicos y posteriormente se añadieron los datos estructurales mapeados (fracturas, fallas y estructura mineralizada). El segundo modelo se realizó con base al porcentaje del parámetro RQD de los barrenos de exploración para categorizar la calidad del macizo rocoso, con la finalidad de añadir los datos estructurales y un plano de estratificación, lo que permitió la identificación de zonas de riesgo. Finalmente, con la integración de los modelos generados y el análisis geotécnico se propuso zonificar la obra en desarrollo para las respectivas sugerencias geotécnicas.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*Abstract***Modelo Geológico-estructural y caracterización del macizo rocoso de la veta 6500**by **Miriam Álvarez Anguiano**

The Fresnillo Mining District, located in the state of Zacatecas, has an epithermal deposit of great interest in the main silver extraction. This work presents the methodology of mapping and geological-structural survey of the study area, the Veta 6500, located in the eastern part of the mine, following the internal procedure of the geology department. Approximately 200 m were mapped and with the data collected from faults and fractures, a structural analysis was made in order to determine the main efforts vector which at some point in geological time gave origin to such discontinuities. In addition, the rocky massif of the area studied based on the RMR of Bieniawski (1989), was characterized in order to give a geotechnical recommendation for the stability of the developing work. On the other hand, two models were created using Leapfrog Geo software from the database of 28 scanning holes exported from the DH Loguer program. The first model obtained was the geological one where the lithological boundaries were defined and subsequently the mapped structural data (fractures, faults and mineralized structure) were added. The second model was based on the percentage of the RQD parameter of the exploration holes to categorize the quality of the rock massif, in order to add the structural data and a stratification plane, which allowed the identification of risk zones. Finally, with the integration of the generated models and geotechnical analysis, it was proposed to zone the developing work for the respective geotechnical suggestions.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	iii
Resumen	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tablas	xii
1 Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Antecedentes	2
1.5 Análisis FODA	3
2 Medio físico	5
2.1 Localización y vías de acceso	5
2.2 Clima y vegetación	5
2.3 Fisiografía	6
2.4 Hidrografía	9
3 Geología del Distrito Minero de Fresnillo	12
3.1 Estratigrafía	12
3.2 Geología estructural	15
3.3 Geología económica	16
4 Operación en Minera Fresnillo plc	23
4.1 Métodos de minado	24
4.2 Estadísticas de producción	26
5 Metodología de trabajo	28
5.1 Trabajo en campo	28
5.1.1 Equipo y material de trabajo	28

5.1.2	Mapeo geológico y estructural	30
5.1.3	Caracterización del macizo rocoso (RMR y Q)	35
5.2	Trabajo de gabinete	36
5.2.1	Digitalización del mapeo en los planos topográficos	36
5.2.2	Análisis estructural	36
5.2.3	Modelo geológico-estructural de la veta 6500	37
5.2.4	Clasificación del macizo rocoso	40
6	Resultados	41
7	Conclusiones y recomendaciones	48
Anexo A	Datos estructurales de fallas y fracturas del nivel 370 (Veta 6500)	50
Anexo B	Formatos de levantamiento geomecánico	53
Anexo C	Plano geológico-estructural	57
Bibliografía		59

Lista de Figuras

FIGURA 2.1:	Ubicación del Distrito Minero de Fresnillo.	6
FIGURA 2.2:	Vegetación de las sierras Zacatecasas.	6
FIGURA 2.3:	Provincias fisiográficas del estado de Zacatecas. (INEGI, 1981)	7
FIGURA 2.4:	Vista panorámica del Cerro Proaño.	7
FIGURA 2.5:	Distribución geográfica de las regiones hidrográficas en el estado de Zacatecas.	9
FIGURA 2.6:	Regiones Hidrológicas en el Municipio de Fresnillo y ubicación del área de estudio.	10
FIGURA 3.1:	Litología en superficie en el Distrito Fresnillo y sus vetas principales.	13
FIGURA 3.2:	Columna estratigráfica general de la Unidad Minera de Fresnillo.	15
FIGURA 3.3:	Mapa con la geología estructural a una escala regional de la zona de estudio. Modificado de Nieto-Samaniego et al. (2005).	16
FIGURA 3.4:	Esquema de un yacimiento epitermal. (Camprubí et al., 2003)	17
FIGURA 3.5:	Diagrama con la zonificación vertical de las texturas de un yacimiento epitermal.	18
FIGURA 3.6:	Ejemplos de texturas más representativas de vetas epitermales en Minera Fresnillo.	18
FIGURA 3.7:	Fotografías de dos muestras de mano tomadas en el interior de la mina diferentes texturas.	18
FIGURA 3.8:	Ubicación del ambiente geológico y tectónico de un yacimiento epitermal. Modificado de Maldonado (2008)	19
FIGURA 3.9:	Principales minerales y menas en la Unidad Minera de Fresnillo.	20
FIGURA 3.10:	Sección geológica y principales vetas del Distrito Minero de Fresnillo.	22
FIGURA 4.1:	Esquema del macroproceso de operación minera en Minera Fresnillo.	24
FIGURA 4.2:	Producción de la mina en el Distrito Minero de Fresnillo (1921 – 2004).	27
FIGURA 5.1:	Equipo personal de trabajo para el interior de la mina.	28

FIGURA 5.2:	Equipo de protección personal de trabajo para el interior de la mina.	29
FIGURA 5.3:	Camionetas del departamento de Geología de la mina.	29
FIGURA 5.4:	Equipo utilizado para trabajo de gabinete.	30
FIGURA 5.5:	Marcado sistemático en las tablas de la obra minera como referencia para realizar el mapeo geológico-estructural.	32
FIGURA 5.6:	Proyección y alineación de la sombra del flexómetro con la veta.	33
FIGURA 5.7:	Toma del dato y registro del ángulo de inclinación de la estructura mineralizada.	33
FIGURA 5.8:	Registro del mapeo geológico y estructural en el interior de la mina.	34
FIGURA 5.9:	Mapeo de la veta 6500 y fracturas en el interior de la mina.	34
FIGURA 5.10:	Registro del mapeo geológico y estructural en el interior de la mina.	35
FIGURA 5.11:	Vista de resultados del análisis estructural en diferentes softwares (a) Leapfrog Geo, (b) Stereo32.	37
FIGURA 5.12:	Proceso para la generación del modelo geológico.	38
FIGURA 5.13:	(a) Distribución estadística de cada litología (b) Estadística del dominio de una litología (Lu-ar)	39
FIGURA 5.14:	Asesoría para la interpretación de datos y secciones geológicas.	40
FIGURA 6.1:	Estereograma de fallas y fracturas del nivel 370 de la Veta 6500	42
FIGURA 6.2:	Modelo geológico del área de estudio.	42
FIGURA 6.3:	Sección geológica A-B en el modelo geológico de la Veta 6500.	43
FIGURA 6.4:	Modelo numérico con base al RQD de las litologías	44
FIGURA 6.5:	Sección transversal del modelo con base al RQD y ubicación del nivel 370.	44
FIGURA 6.6:	Secciones longitudinales y zonas de riesgo en el nivel 370 (a) y (b).	45
FIGURA 6.7:	Diagrama para determinar la categoría de sostenimiento tomando en cuenta los valores del índice Q de Barton (2000). (Modificado de González de Vallejo et al. (2002))	47

Lista de Tablas

TABLA 1.1:	Análisis FODA	4
TABLA 6.1:	Resultado de los esfuerzos principales en un determinado momento geológico.	41
TABLA 6.2:	Resultados de ventanas geotécnicas y clasificación del macizo rocoso.	46

Torreón, Coahuila a 30 de Enero 2019

ATENCIÓN

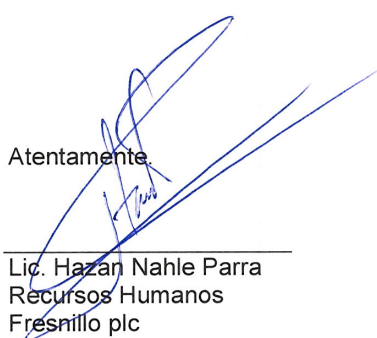
A quien corresponda
Coordinación de la facultad de Ingeniería de la división de ingeniería en ciencias de la tierra
UNAM

AUTORIZACIÓN DE USO DE DATOS

Por medio de la presente me permito informarle que la alumna **MIRIAM ALVAREZ ANGUIANO**, quien realizó sus residencias profesionales en Minera Fresnillo durante el periodo Septiembre-Noviembre 2018 puede utilizar los datos recabados durante la elaboración de su proyecto "Modelo geológico-estructural y caracterización del macizo rocoso de la veta 6500" para fines educativos y escolares exclusivamente.

Documento válido única y exclusivamente con fines académicos.

Atentamente,



Lic. Hazan Nahle Parra
Recursos Humanos
Fresnillo plc

GENERALIDADES

1.1 Introducción

México es un país destacado por su riqueza en recursos naturales, razón por la cual es de gran importancia para el sector minero. Zacatecas es uno de los estados de la República Mexicana que se destaca por su actividad minera que ya que posee yacimientos de gran interés económico. Tal es el caso del Distrito Minero de Fresnillo, lugar donde se ubica el área de estudio del presente trabajo.

La mina de Fresnillo plc, también conocida como Minera Proaño, es una mina subterránea muy antigua que ha sido explotada desde el siglo XVIII; se trata de un yacimiento epitermal de gran interés a nivel nacional e internacional capturando la atención de inversionistas debido a la importancia y extracción de uno de los principales elementos obtenidos: la plata. Cabe destacar que México es productor de plata de clase mundial desde hace ya varias décadas.

Dentro de las actividades de las operaciones mineras, en la etapa de exploración y explotación de recursos en la mina, la toma de decisiones de los departamentos de geología, minas y planeación tienen un gran impacto en la producción y seguridad de la misma. En cuanto mejor se tenga caracterizada la zona donde explotará el mineral y se cuente con un modelo digital, con respecto al tema de seguridad se pueden prever incidentes mediante la identificación de zonas de riesgo, por ejemplo, sitios donde se puedan tener colapsos o caídas de bloques. Por otra parte, dichos incidentes no sólo incrementan la cantidad de dilución, es decir, la disminución de la ley del mineral económico sino también eleva los costos de explotación y producción. Es por ello que, en el presente trabajo se destaca la importancia de ubicar zonas de riesgo y la elaboración un modelo geológico-estructural, así como el análisis a detalle del macizo rocoso para la estabilidad del desarrollo minero en el subnivel 370 para la explotación de la Veta 6500 del área oriente de la mina.

Vale la pena mencionar que éste trabajo fue realizado en un periodo de tres meses en el año 2018 por medio de un programa de estancias organizado por Grupo BAL, agradeciendo las facilidades, atenciones y apoyo que me dieron durante la estancia en la mina para poder llevar a cabo este proyecto.

1.2 Objetivo General

Elaborar modelo geológico-estructural y caracterizar el macizo rocoso de la Veta 6500 para identificar zonas de riesgo, mejorar su estabilidad y desarrollo del minado.

1.3 Objetivos específicos

Para poder alcanzar el objetivo general del presente trabajo es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- ▶ Realizar el mapeo geológico-estructural del nivel 370 de la Veta 6500.
- ▶ Efectuar el análisis estructural del nivel 370 de la Veta 6500.
- ▶ Generar un modelo geológico-estructural utilizando el software Leapfrog Geo.
- ▶ Obtener secciones longitudinales y transversales del modelo generado.
- ▶ Ubicar zonas de riesgo del nivel 370 de la Veta 6500.
- ▶ Emitir las recomendaciones geotécnicas pertinentes para la estabilidad y desarrollo de la obra.

1.4 Antecedentes

Actualmente en la Unidad Minera Proaño de Grupo Fresnillo plc, el departamento de planeación determina los métodos de minado en función a su modelo de reservas y el valor del mineral, sin contemplar factores geológicos-estructurales y la calidad del macizo rocoso que aseguren una mejor estabilidad en el desarrollo de su producción.

El proyecto surge de identificar dicha situación y la necesidad de realizar un modelo geológico-estructural que sirva como herramienta a diferentes departamentos: geología, mecánica de rocas, planeación y mina; con lo cual se tendría una producción más eficiente mejorando los costos de operación. Además, permitirá tener herramientas para una mejor toma de decisiones, identificar zonas de riesgo y prevenir incidentes a través de recomendaciones para la mejora de la estabilidad de obras mineras.

Para realizar el proyecto se eligió trabajar en los niveles 370 y 425 de la Veta 6500 aprovechando que dichos niveles se encontraban en etapa de desarrollo y las actividades que se estaban llevando a cabo en esos sitios requería la toma de datos estructurales y mapeo geológico, información necesaria para la elaboración del modelo geológico-estructural. Además, para poder dar una recomendación geotécnica de la obra se requirió de caracterizar el macizo rocoso del área de estudio.

1.5 Análisis FODA

Antes de comenzar a desarrollar el proyecto, se realizó un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA), con la finalidad de tener una herramienta para la administración y planeación de este, así como identificar la mayor cantidad de factores que se involucran para lograr el objetivo y que ayuden a tomar las mejores decisiones en el desarrollo de las actividades contempladas en el transcurso del proyecto.

A continuación, se muestra una síntesis del análisis FODA:

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Búsqueda de mejora continua en desarrollo del personal y metodologías empleadas en las actividades del departamento de geología. • Tecnología y softwares especializados para el trabajo de gabinete. • Creación e innovación frecuente de proyectos. • Trabajo en equipo interdisciplinario. • Conocimiento del comportamiento de las estructuras mineralizadas de la mina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponer de yacimiento mineral de importancia internacional. • Rápida evolución de la tecnología y softwares especializados para la industria minera. • Tendencias de uso de los recursos minerales para la industria. • Variación positiva del valor económico mineral.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de comunicación efectiva y supervisión de obra entre los departamentos de geología, planeación y mina. • Falta de modelo geotécnico. • Mapeo geológico con deficiencia de caracterización y detalle en obras de desarrollo para los tipos de minado que se llevan a cabo. • Falta de planeación con áreas operativas para tener el tiempo suficiente para un mapeo apropiado. • No existe modelo geotécnico con la base de datos de los barrenos de exploración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de precios de insumos para la explotación. • Competencia en el mercado. • Condiciones geológicas de la mina. • Reformas en la legislación minera. • Ausencia de ley de corte. • Reducción del valor económico mineral. • Pandemia.

TABLA 1.1: Análisis FODA

MEDIO FÍSICO

2.1 Localización y vías de acceso

El Distrito Minero de Fresnillo se encuentra en el Municipio de Fresnillo en Zacatecas. La extensión del municipio de Fresnillo es de 5,092.92 km², es decir el 6.6 % de la superficie del estado de Zacatecas, de acuerdo con el INAFED (2010). Con respecto a la topografía del lugar, la ciudad de Fresnillo se encuentra a una elevación de 2200 m sobre nivel del mar y está ubicado en la parte central de la República Mexicana, aproximadamente a 60 km al noroeste de la Ciudad de Zacatecas, la principal vía de acceso es a través de la Carretera Federal No.45. Las coordenadas de ubicación del sitio son latitud norte 23° 10' 29" y longitud oeste 102° 52' 39 ". Debido a la ubicación geográfica del municipio de Fresnillo, dispone de varias vías de acceso por carretera: al norte con las ciudades de Durango, Torreón y Saltillo, al sur con Valparaíso, San Luis Potosí, Querétaro y Aguascalientes, y al oeste con Nayarit y Jalisco (Figura 2.1).

2.2 Clima y vegetación

En el municipio de Fresnillo, con base en el mapa climatológico del INEGI, el clima predominante en más del 90 % del territorio es seco cálido semiseco, y el resto del territorio cuenta con un clima templado subhúmedo. Las temperaturas promedio de las estaciones del año son de 19° C en primavera, 20° C en verano, 15° C en otoño y 10° C en invierno.

Con respecto al mapa de uso de suelo y vegetación del INEGI, en las sierras zacatecanas existen bosques mixtos de pinos y encinos; en los llanos y valles abundan mezquite, gobernadora, huizache, nopal, lechuguilla, guayule y pastizales (Figura 2.2). El 35.03 % del suelo del territorio municipal se emplea para la agricultura de riego y temporal de maíz, chile, frijol, durazno y cebada.

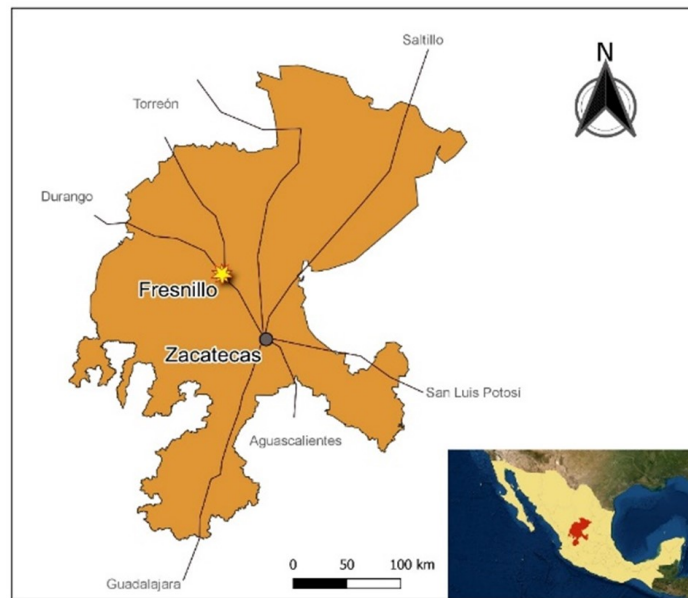


FIGURA 2.1: Ubicación del Distrito Minero de Fresnillo.



FIGURA 2.2: Vegetación de las sierras Zacatecas.

2.3 Fisiografía

El territorio del estado de Zacatecas abarca cuatro de las quince regiones fisiográficas que determinó el INEGI: Sierra Madre Occidental, Mesa Central o Mesa del Centro, Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana, de esta última provincia ocupa sólo una pequeña parte al suroeste de Zacatecas. La distribución de

dichas provincias se puede apreciar en la Figura 2.3 , además se distingue que el área de estudio se localiza en la Mesa Central, donde las ramificaciones de la sierra de Fresnillo dan origen al simbólico y emblemático Cerro Proaño (Figura 2.4) por sus yacimientos de plata, plomo y zinc.

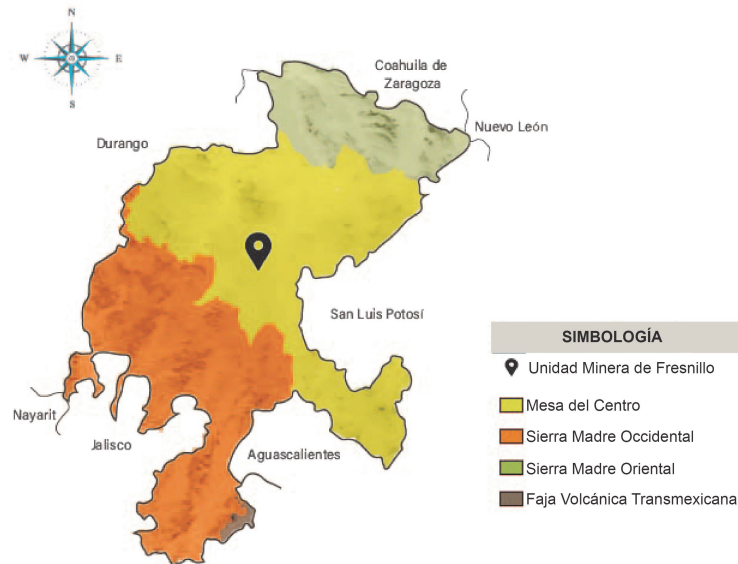


FIGURA 2.3: Provincias fisiográficas del estado de Zacatecas. (INEGI, 1981)



FIGURA 2.4: Vista panorámica del Cerro Proaño.

A continuación, se describirán las características más importantes de las provincias del estado de Zacatecas:

- **Sierra Madre Occidental.** Se conforma principalmente de rocas ígneas extrusivas. En un inicio se trataba de una gran meseta, al paso de millones de años como consecuencia de procesos de intemperismo y erosión se formaron picos, mesetas, barrancas y cañones. La Sierra Madre Occidental (SMO) “es el complejo montañoso más grande de México, extendiéndose por casi 1200 km” (González-Elizondo et al., 2012). La sierra está orientada noroeste-sureste, comienza su

extensión 50 km desde la frontera con Estados Unidos hacia el sur, y finaliza en el río Santiago, ubicado en el estado de Nayarit y la FVTM. La Sierra Madre Occidental tiene un cambio de anchura de norte a sur; en la parte norte se encuentra separada de la costa aproximadamente 300 m y mientras que, en el sur, la sierra es de menor anchura además de estar más próxima a la costa. La altura media de la Sierra Madre Occidental es alrededor de 2,100 a 2,200 msnm, sin embargo en algunos picos alcanzan alturas entre 2,800 y 3,000 msnm (Ferrari et al., 2018; Ordóñez, 1941).

- ▶ **Sierra Madre Oriental.** Está formada “como un edificio de sedimentos marinos mesozoicos y continentales cenozoicos deformados durante el Cenozoico” (Fitz-Díaz et al., 2018; Tardy et al., 1975). La provincia se localiza al este de la República Mexicana, con rumbo noroeste-sureste, tiene una extensión aproximada mayor a 1,600 km (Ordóñez, 1941); comienza en la frontera con los Estados Unidos, en el sur del estado de Texas, siguiendo por la ciudad de Monterrey en el Estado de Nuevo León, donde tiene una flexión al oeste y luego al norte; después sigue hacia el sur por el Estado de Veracruz hasta hallarse con la FVTM.
- ▶ **Mesa del Centro o Mesa Central.** Se localiza en la parte centro del país y es una provincia fundamentalmente plana, las llanuras que posee están cortadas por algunas sierras de la zona. Constituida principalmente por rocas sedimentarias, como calizas, y rocas volcánicas como andesitas, riolitas y basaltos (Ordóñez, 1941). Incluye a los Estados de Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato y Jalisco. La región de la Mesa Central que cuenta con más cantidad de sierras y con las cotas más elevadas es la región sur (Nieto-Samaniego et al., 2005), abarcando los Estados de Guanajuato, Zacatecas y San Luis Potosí. Por otro lado, la región norte de la Mesa Central es de mayor extensión, con las cotas más bajas y se distingue por tener un estado de erosión más desarrollado “con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, algunas de ellas endorreicas” (Nieto-Samaniego et al., 2005). La altitud media de la provincia es de 1800 msnm, sin embargo, en algunas zonas sobrepasan los 2000 msnm. La mineralización de los yacimientos minerales reconocidos en la Mesa del Centro, está sobre las trazas de grandes sistemas de fallas de la región (Nieto-Samaniego et al., 2005). En esta provincia fisiográfica es donde se ubica el distrito minero de Fresnillo, la zona de estudio.
- ▶ **Faja Volcánica Transmexicana.** Esta provincia fisiográfica está constituida por varios tipos de roca y un relieve variado, se distingue por la existencia de estrato-volcanes con orientación N-S y diversos volcanes pequeños alineados con dirección NE-SW (Demant, 1978; Ferrari et al., 2005). El ancho de faja es de

130 km y atraviesa la República Mexicana de oeste a este, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México; comienza en la costa occidental donde desemboca el río Grande de Santiago a la Bahía de Banderas, sigue con dirección al sureste hasta topar con el volcán de Colima, continúa alrededor de la latitud 19° N terminando en el pico de Orizaba y el Cofre de Perote. La longitud aproximada de la FVTM es de 880 km. Contiene las cimas de montañas más altas de la nación, siendo el pico de Orizaba (Citlaltépetl) el volcán más alto en México con una altitud reportada por el Servicio Geológico Mexicano de 5,636 msnm. La Sierra Volcánica Transversal define el límite físico de América del Norte y Centroamérica (Ortíz, 2008).

2.4 Hidrografía

La República Mexicana está dividida en 37 regiones hidrológicas (RH) que contienen 731 cuencas hidrológicas, las cuales fueron determinadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para fines administrativos nacionales. La distribución del agua superficial del estado de Zacatecas comprende parte de cuatro regiones hidrológicas que se enlistan a continuación y su distribución geográfica puede observarse en la Figura 2.5 :

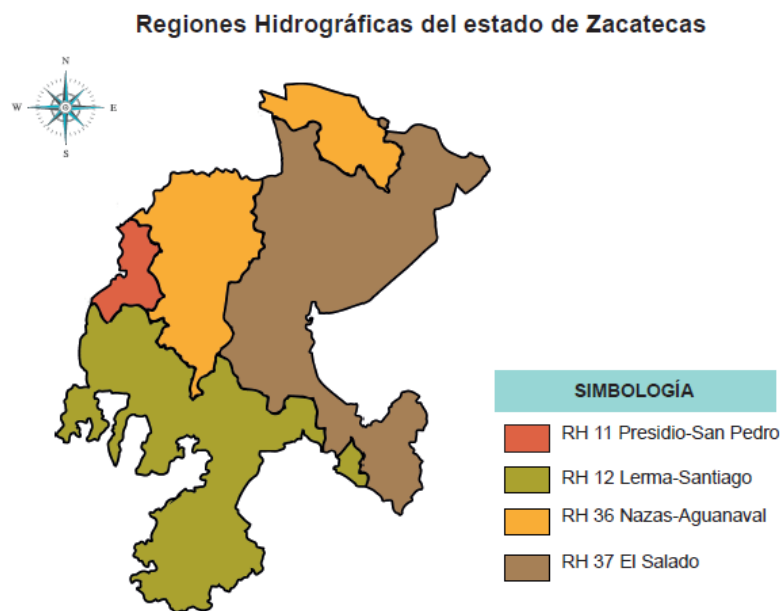


FIGURA 2.5: Distribución geográfica de las regiones hidrográficas en el estado de Zacatecas.

El Municipio de Fresnillo abarca dos regiones hidrológicas (Véase Figura 2.6), las cuales se describirán brevemente a continuación:

- **RH 36 Nazas-Aguanaval:** la extensión territorial continental es de 93 032 km², del estado de Zacatecas cubre un 23.01 %, las aguas del noreste y oeste son drenadas principalmente del río Aguanaval finalizando su depósito en la Laguna de Viesca (cuenca endorreica). La RH 36 dispone de 16 cuencas hidrológicas de las cuales las que cubren territorio Zacatecano y su porción son: Laguna de Mayrán y Viesca (6.67 %) y Río Aguanaval (16.34 %) (CONAGUA, 2015).
- **RH 37 El Salado:** tiene una extensión territorial continental de 87 801 km², cubriendo el 40.67 % del estado de Zacatecas. La componen cuencas cerradas, caracterizadas por contar con corrientes temporales de trayecto limitado y pobremente caudalosas, perdiéndose por procesos como la filtración y evaporación en las llanuras. Esta región comprende ocho cuencas hidrológicas. A continuación, se mencionan las cuencas y la porción del territorio de Zacatecas que cubren: Fresnillo-Yesca (16.09 %), Camacho-Gruñidora (10.95 %), San Pablo y Otras (6.85 %), Sierra de Rodríguez (5.38 %), Matehuala (1.3 %) y Presa San José-Los Pilares y Otras (0.10 %). En la cuenca hidrológica Fresnillo- Yesca se ubica el área de estudio del presente trabajo (CONAGUA, 2015).

Regiones Hidrográficas de Fresnillo

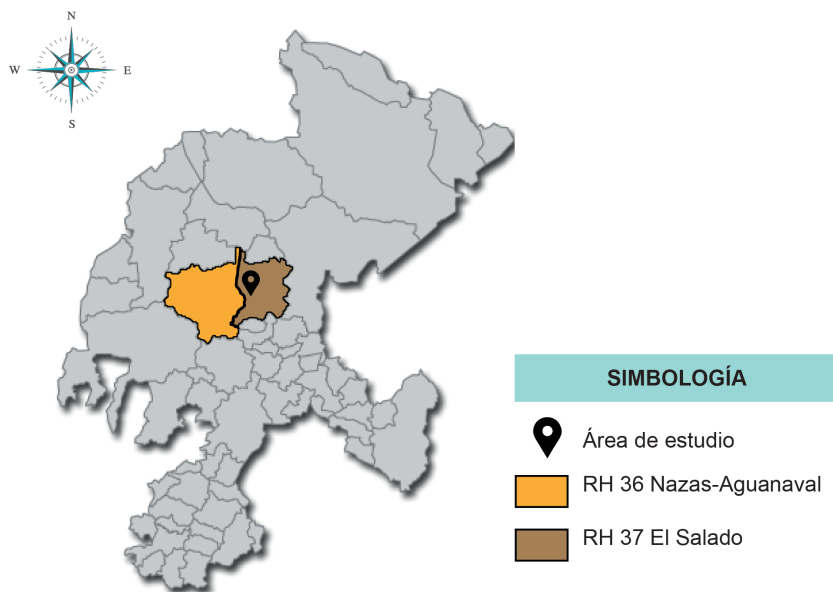


FIGURA 2.6: Regiones Hidrológicas en el Municipio de Fresnillo y ubicación del área de estudio.

Dentro de los límites del municipio de Fresnillo se localizan los siguientes cuerpos de agua: Presa Santa Rosa, Presa Gobernador Leobardo Reynoso y Laguna de Santa

Ana.

Respecto al agua subterránea, la entidad de Zacatecas muestra un balance hídrico negativo, esto significa que, en los acuíferos de la región, la extracción de agua es mayor que la recarga y de los 34 acuíferos que dispone el Estado, delimitados por CONAGUA, 14 se encuentran con déficit, lo que representa un 41.17% del total de acuíferos, entre ellos está el acuífero 3214 Aguanaval, localizado en la zona de estudio (CONAGUA, 2015).

GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE FRESNILLO

3.1 Estratigrafía

A continuación, se describe de manera general la estratigrafía que yace en la Unidad Minera de Fresnillo en Zacatecas. La edad correspondiente a la secuencia con un dominio volcano-sedimentario relacionado con un arco, conocido como terreno Guerrero, abarca del Jurásico Superior al Cretácico (Campa & Coney, 1983), distinguido por la presencia de lutitas, grauvacas, calizas, conglomerados, y material volcánico andesítico con intercalaciones de depósitos terrígenos y en menor abundancia con rocas calcáreas.

En la Figura 3.1 se muestra la distribución de las diferentes litologías que afloran en la superficie que son tobas riolíticas, conglomerado, grauvaca superior e inferior, lutitas calcáreas y andesitas y sedimentos de la Formación Chilitos, además se observa la distribución de las vetas principales en color rojo, así como un par de ríos de la zona llamadas Chilitos y El Águila. Más adelante se describen brevemente las formaciones geológicas a las que pertenecen con base en el Léxico Estratigráfico Mexicano.

- **Formación Chilitos.** Jurásico Tardío (Tithoniano)-Cretácico Temprano (Valanginiano). El Distrito Minero de Fresnillo es atravesado por un arroyo con el mismo nombre de la formación geológica propuesta por De Cserna (1976), la cual está conformada por una secuencia volcano-sedimentaria de lavas andesíticas de color gris oscuro que presentan tonalidades de color rojo y verde, con estructuras almohadilladas, rocas brechadas de color verde con tonalidad rojiza que parecieran rocas epiclásticas. Otros autores describen que además de lava almohadillada, la formación Chilitos presenta lutitas silíceas estratificadas,

encuentra intercalado con estratos delgados de lutitas calcáreas y lentes de caliza.

- Lutitas calcáreas y carbonosas.- (Albiano Superior). Miembro medio del Grupo Proaño, corresponde a una alternancia de lutitas calcáreo-carbonosas y calizas arcillosas, se encuentran en su generalidad como impuras, con lo que se puede inferir que provienen de un ambiente de depósito donde la aportación de terrígenos fue el dominante.
- Grauvaca superior.- (Cretácico Temprano). Miembro superior del Grupo Proaño, se conforma por litologías de areniscas masivas con una secuencia de areniscas y lutitas distinguidas por una estratificación fina. En algunos casos se encuentran horizontes alternados de estratificación fina de lutitas-carbonosas, calizas, lutitas y areniscas.

En cuanto a la Formación Valdecañas, se reporta un espesor de 700 m (De Cserna, 1976), sin embargo, en la región de la mina Proaño varía de 120 a 720 m debido a que se reporta como una escama tectónica lenticular (Lemus et al., 2009). La Formación Valdecañas corresponde a la parte inferior del Grupo Proaño y descansa discordante sobre la Formación Chilitos (De Cserna, 1976). El ambiente de depósito de la Formación Valdecañas es de depósito marino de plataforma de aguas relativamente profundas, asociado a un arco volcánico (Lemus et al., 2009). Esta formación tiene como principal importancia económica la mineralización de magnesio en forma de mantos principalmente en tres áreas mineralizadas: Manganita, La Abundancia y Tenango.

- **Formación Fresnillo.** Cretácico (Berriaciano-Cenomaniano). Conformada por un depósito masivo de clastos de lutita, arenisca y pedernal, las dimensiones de los clastos tienen una variación de diámetro que va de milímetros hasta 10 cm, son angulosos y sub-redondeados, constituyen dicho depósito entre un 30 y 40 %, están soportados por una matriz bien consolidada de arenas, por sus características la roca está clasificada como una brecha sedimentaria. Esta formación está descrita de forma general como una alternancia de lutitas laminares de color verde olivo y verde oscuro, en capas delgadas, así como areniscas (PEMEX, 1988; Santamaría-Orozco et al., 1990). La Formación Fresnillo corresponde a un ambiente sedimentario clástico de plataforma (PEMEX, 1988). En la base de la veta Santo Niño puede observarse esta formación. El espesor de la unidad geológica en superficie reportado por personal de PEMEX en 1988, fue de 200 m.
- **Rocas Volcánicas.** (Eoceno-Oligoceno). Esta secuencia volcánica se conforma de riolitas y tobas riolíticas, sobreyace a los sedimentos marinos y al conglomerado del Terciario (ahora Paleógeno y Neógeno).

- **Rocas Intrusivas.** (Oligoceno Tardío). Se presentan intrusiones pequeñas clasificadas como cuarzomonzonitas, con plagioclasas sódicas y fenocristales de cuarzo, la conforma una matriz afanítica de color gris a gris claro, constituida por plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo.

A continuación, en la Figura 3.2 se muestra la columna estratigráfica de las litologías descritas anteriormente.

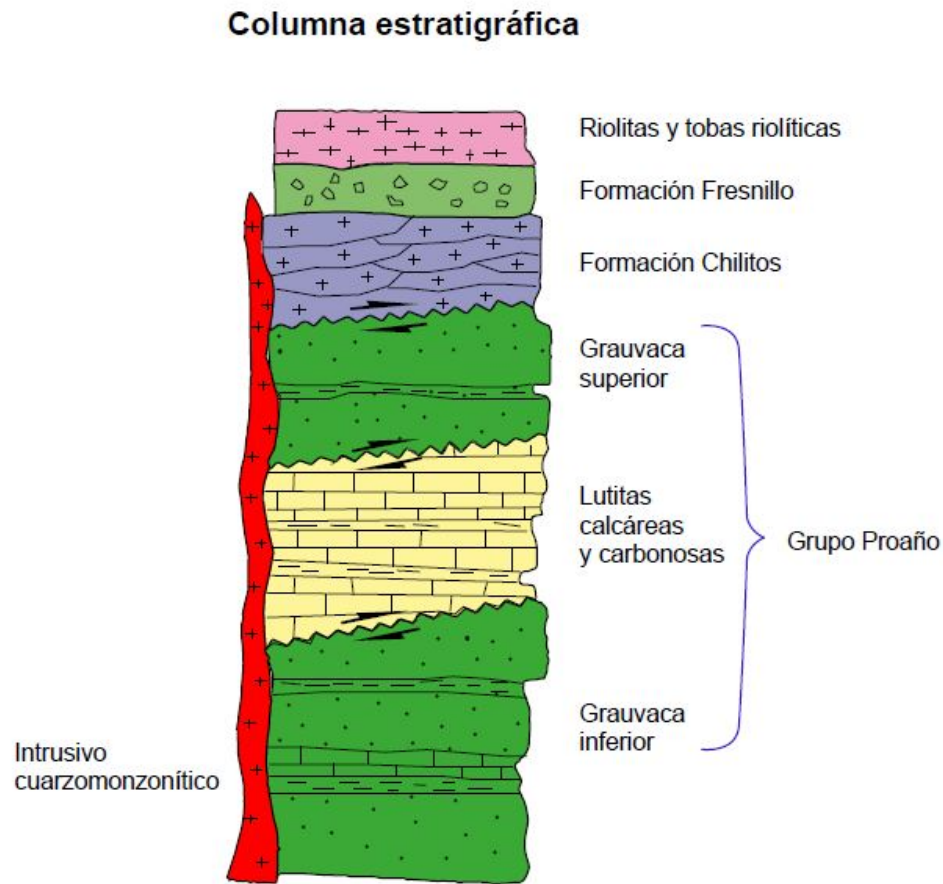


FIGURA 3.2: Columna estratigráfica general de la Unidad Minera de Fresnillo.

3.2 Geología estructural

Con respecto a la geología estructural, de manera local, en el Distrito Minero de Fresnillo predominan dos sistemas estructurales de fracturas y fallas, lugares donde se encuentran emplazados los depósitos minerales de interés económico de la mina con valores importantes principalmente de Ag, Au, Pb y Zn.

El primer sistema estructural de fallas y fracturas corresponde al sistema de vetas del Cerro Proaño, cuya orientación preferencial es NW-SE. El segundo sistema estructural, se trata del sistema de vetas del Área de San Luis en donde la dirección de orientación de las fallas y fracturas que predomina es W-E, cabe mencionar que éste sólo se presenta a partir de los 200 m de profundidad.

Los dos sistemas estructurales de fallas y fracturas en la mina tienen muchas similitudes tanto en composición química, isotópica y textural, lo que permite sugerir que comparten la misma génesis. Además, la orientación de uno de los sistemas de fallas coincide con la orientación del sistema de fallas de San Luis Tepehuanes, visto desde una escala regional, en la región fisiográfica de la Mesa Central (Figura 3.3).

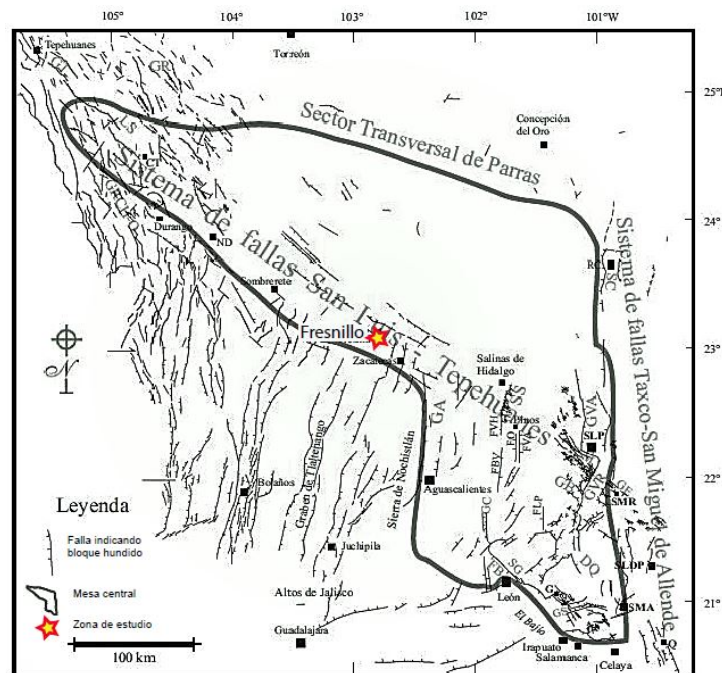


FIGURA 3.3: Mapa con la geología estructural a una escala regional de la zona de estudio. Modificado de Nieto-Samaniego et al. (2005).

3.3 Geología económica

El tipo de yacimiento mineral en el Distrito Minero de Fresnillo está clasificado como un yacimiento de tipo epitermal de baja sulfuración. Este tipo de yacimiento mineral es considerado de los de mayor interés desde un punto de vista científico y económico, la razón se atribuye principalmente a dos elementos que se extraen: el oro y la plata. Además de esos elementos también hay aporte de zinc (Zn), plomo (Pb), cobre (Cu), cadmio (Cd), antimonio (Sb), arsénico (As), selenio (Se), bismuto (Bi), telurio (Te), galio (Ga), germanio (Ge), talio (Tl), molibdeno (Mo), indio (In) y estaño (Sn).

Un yacimiento epitermal, es un depósito mineral metálico y como lo define su etimología, el prefijo griego “*epi*”, cuyo significado es encima o sobre, hace referencia a la parte superficial de los sistemas hidrotermales naturales, este tipo de yacimiento está caracterizado por la mineralogía de sus menas y características texturales, así como las condiciones de formación que abarcan desde la superficie terrestre hasta 1 ó 2 km de profundidad, se encuentran a temperaturas aproximadamente de 150 a 300 °C, eventualmente ocurren a mayor temperatura, con presiones que varían varias centenas de bares (Figura 3.4).

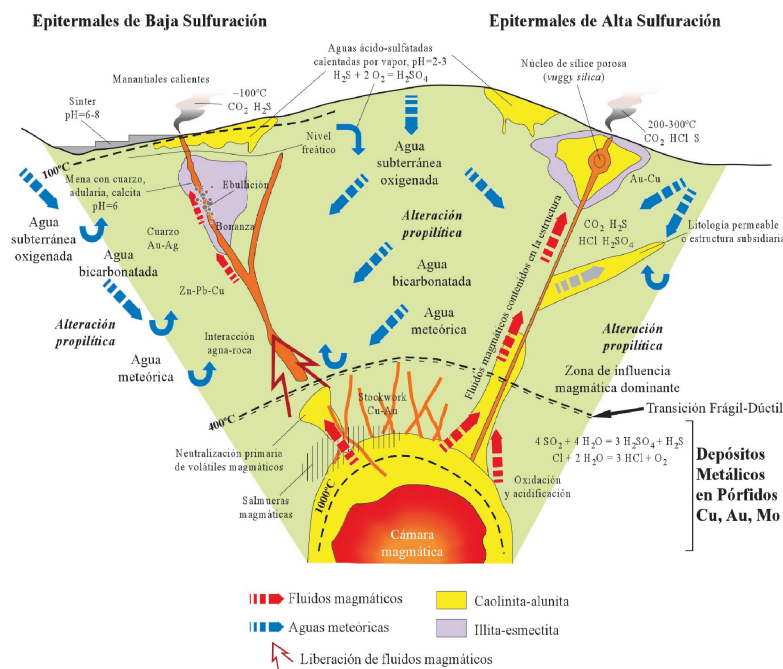


FIGURA 3.4: Esquema de un yacimiento epitermal. (Camprubí et al., 2003)

Las texturas que pueden presentarse en las vetas epitermales son diversas y están en función de la zona en la que estén ubicadas. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: texturas de crecimiento primario y superpuestas, además todas ellas se han definido en 11 clases (Dowling & Morrison, 1989): bandeada, sacaroide, laminada, brechada y de colmena, por mencionar algunas. Como puede observarse en la Figura 3.5, las texturas son distintas si se localizan por encima o por debajo del nivel de ebullición, ya que los cambios de presión y temperatura juegan un papel muy importante, resultando así una variedad de texturas en las que se presenta la mineralización, dichas texturas pueden ser bandeadas presentándose de tipo coliforme, crustiforme, y cocadas (Figura 3.6), representando diferentes eventos de ebullición, estas texturas son las más representativas en el Distrito minero de Fresnillo (Figura 3.7).

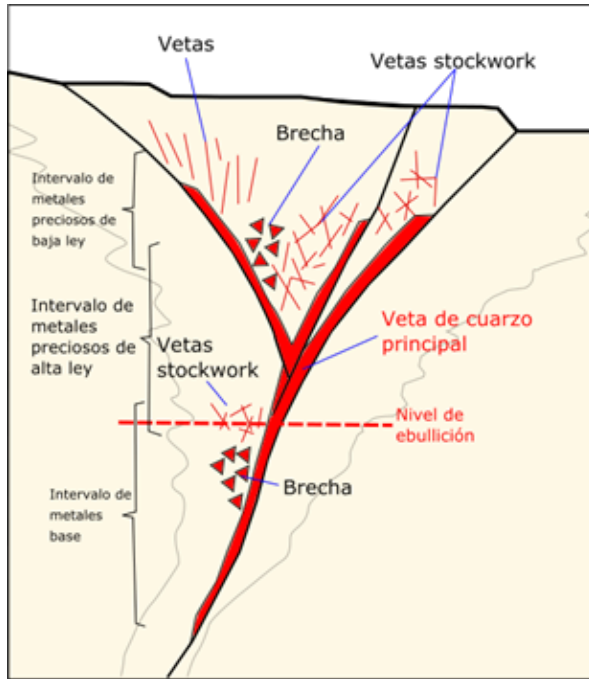


FIGURA 3.5: Diagrama con la zonificación vertical de las texturas de un yacimiento epitermal.



Crustiforme



Cocada



Coloforme

FIGURA 3.6: Ejemplos de texturas más representativas de vetas epitermales en Minera Fresnillo.

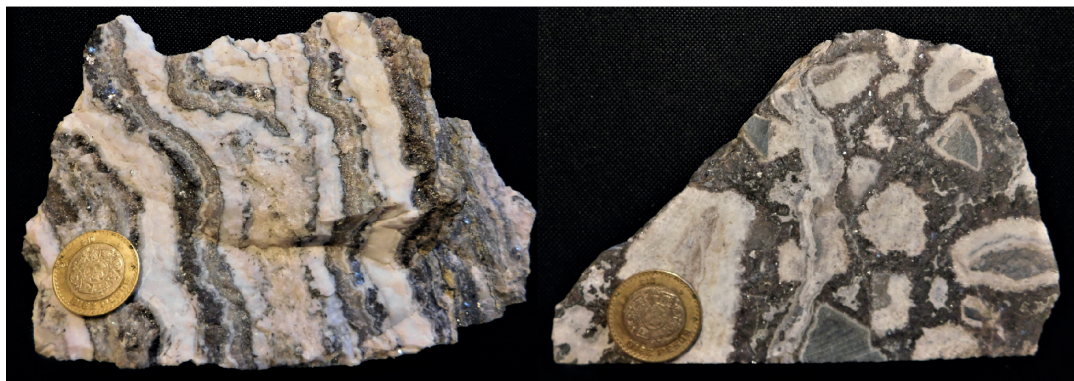


FIGURA 3.7: Fotografías de dos muestras de mano tomadas en el interior de la mina diferentes texturas.

Los sistemas epitermales están relacionados con ambientes geológicos y tectónicos activos, como las zonas de subducción, lugares donde ocurren procesos volcánicos: arcos continentales y de isla oceánica. Además, al ubicarse en zonas tectónicamente activas, dichos yacimientos tienen un control estructural que permiten el emplazamiento de los minerales (Figura 3.8).

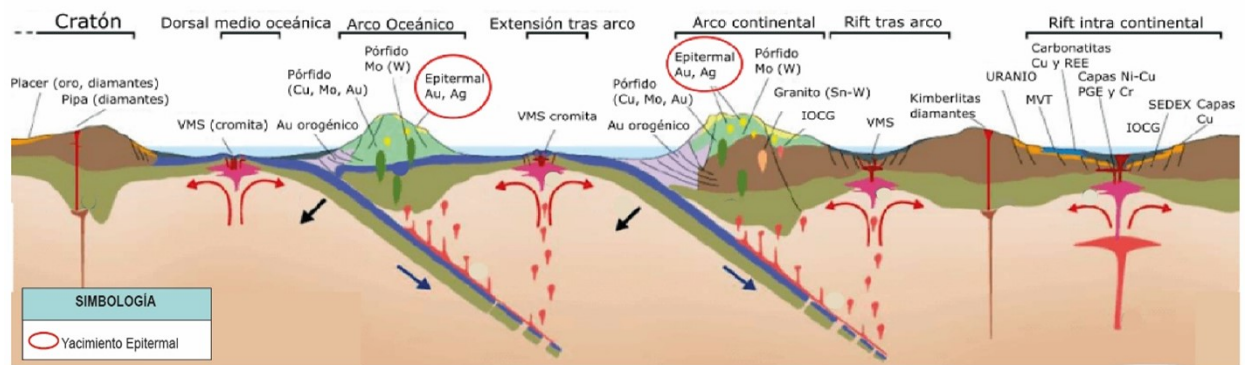


FIGURA 3.8: Ubicación del ambiente geológico y tectónico de un yacimiento epitermal. Modificado de Maldonado (2008)

Los países que cuentan con depósitos epitermales tienen la característica de ser muy ricos en plata históricamente. Cabe mencionar que México ha ocupado regularmente los primeros lugares como productor de plata a nivel mundial desde el año de 1900. La Secretaría de Economía en el 2019 comunicó que México “ocupa el 1er lugar en la producción de plata a nivel mundial” y “se ubica entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales: plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro y cobre”, lo que hace que nuestro país sea un gran atractivo para inversionistas a nivel mundial en la minería por sus beneficios económicos, sociales y tecnológicos, y que el sector minero se distinga con su aportación al Producto Interno Bruto nacional.

En el Distrito Minero de Fresnillo los cuerpos minerales de importancia económica que se han explotado son mantos, diseminados, stockwork, chimeneas y vetas, siendo éstas últimas las estructuras de mayor relevancia económica y de interés para su exploración y explotación. Las principales menas de minerales de la mina son galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirargirita (Ag_3SbS_3), acantita (Ag_2S), polibasita ($Cu(Ag, Cu)_6Ag_9Sb_2S_{11}$), y argentita (Ag_2S) (Figura 3.9).

A continuación, se hará una breve descripción con las características más importantes de las principales vetas del Distrito Minero de Fresnillo (Vallejo, s.f):

1. Veta Santo Niño.

La veta se descubrió en el año de 1975, es una de las más importantes por sus dimensiones, por la ley promedio que aporta al distrito y el tonelaje de extracción. La veta Santo Niño tiene una orientación general de $N75^\circ E$, con una variación local de $\pm 20^\circ$ y una inclinación entre 60° y 85° al sur, el ancho varía de 0.1 m hasta más de 6 m, en promedio el ancho es de 2.81 m con una longitud

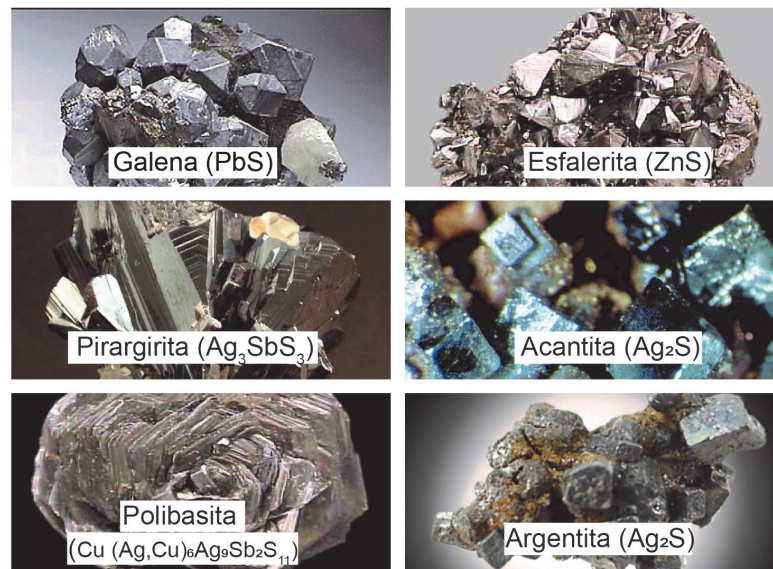


FIGURA 3.9: Principales minerales y menas en la Unidad Minera de Fresnillo.

de 2 500 m. Los niveles desarrollados en el interior de la mina para la explotación de dicha veta son del 215 al 695. Las principales menas de minerales que se extraen de esta veta son pirargirita, polibasita, tetrahedrita, proustita, esfalerita, galena y argentita.

2. San Diego.

La estructura de San Diego tiene una orientación promedio de S67°E y con un echado promedio de 55° al SW; se encuentra 600 m al sur de la veta San Carlos, en el extremo sur-poniente. La longitud de la veta conocida es de 2 500 m. El contenido mineral consiste en masivos de galena y esfalerita, calcita relleno vetillas, cuarzo en estructuras bandeadas, con alteraciones argílica y clorítica, sulfosales como pirargirita, proustita y polibasita, además de óxidos de hierro como hematita y pirrotita como ganga.

3. Santa Cruz.

Es la veta más al sur que se tiene desarrollada en la mina, con un rumbo promedio al N78°W y un echado de $\pm 65^\circ$ al NE, la longitud aproximada de la estructura es de 1 500 m y un ancho promedio de 4.7 m. Mineralógicamente la estructura se compone de cuarzo amatista, cuarzo blanco, y calcita; la textura

en la que se presenta la mineralización es de tipo coliforme con zonas de brechamiento y con minerales de sulfosales y sulfuros de plata.

4. San Carlos.

La veta San Carlos se localiza al sur poniente de la mina y se caracteriza por su rumbo promedio Este-Oeste en la parte oriente mientras que al poniente presenta una flexión de rumbo al NW, con una inclinación de $\pm 65^\circ$ al SE; el ancho promedio de la estructura es de 3.10 m. La composición mineralógica de la veta consiste en sulfuros y sulfosales de plata como galena, esfalerita, argentita, pirargirita y polibasita, presentando una textura en general bandeada con zonas de brecha al bajo y al alto de la veta.

5. San Mateo.

La estructura de San Mateo tiene un rumbo general de S80°E, con un echado de $\pm 75^\circ$ al Sur, cuenta con un ancho promedio de 1.76 m y una longitud conocida con barrenos de diamante y obra de 1 000 m aproximadamente. Se ubica a 600 m al alto del extremo oriente de la Veta Santo Niño. La mineralización de la estructura es de cuarzo y calcita de forma irregular, presenta alteración clorítica, sulfuros de plomo, zinc y plata además de un importante contenido de oro.

6. Veta Ramal 8.

La veta Ramal 8, fue cortada por un barreno de exploración en el año 2011, se encuentra al norponiente de la mina, tiene un rumbo promedio de S56°E, con echado de $\pm 50-60^\circ$ al SW y un ancho promedio de 1 m. La estructura exhibe una textura bandeada en general, al bajo de la veta se aprecia una zona de brecha. Mineralógicamente la veta consiste en sulfuros y sulfosales de plata como esfalerita, galena y pirargirita, por otra parte, como minerales de ganga se tienen pirita, cuarzo y calcita. Las alteraciones manifestadas en la veta por mencionar algunas son argilización, en un grado que va de moderado a fuerte y alteración propilítica de alto grado.

7. Veta San Ricardo.

Es una estructura alojada en una brecha de falla con un rumbo N75°W, buzando 75° al NE, la longitud de la estructura es de 1 200 m y el ancho promedio es

de 2.86 m. La mineralogía predominante en esta veta es de sulfuros de plomo y zinc con un poco de sulfosales de plata.

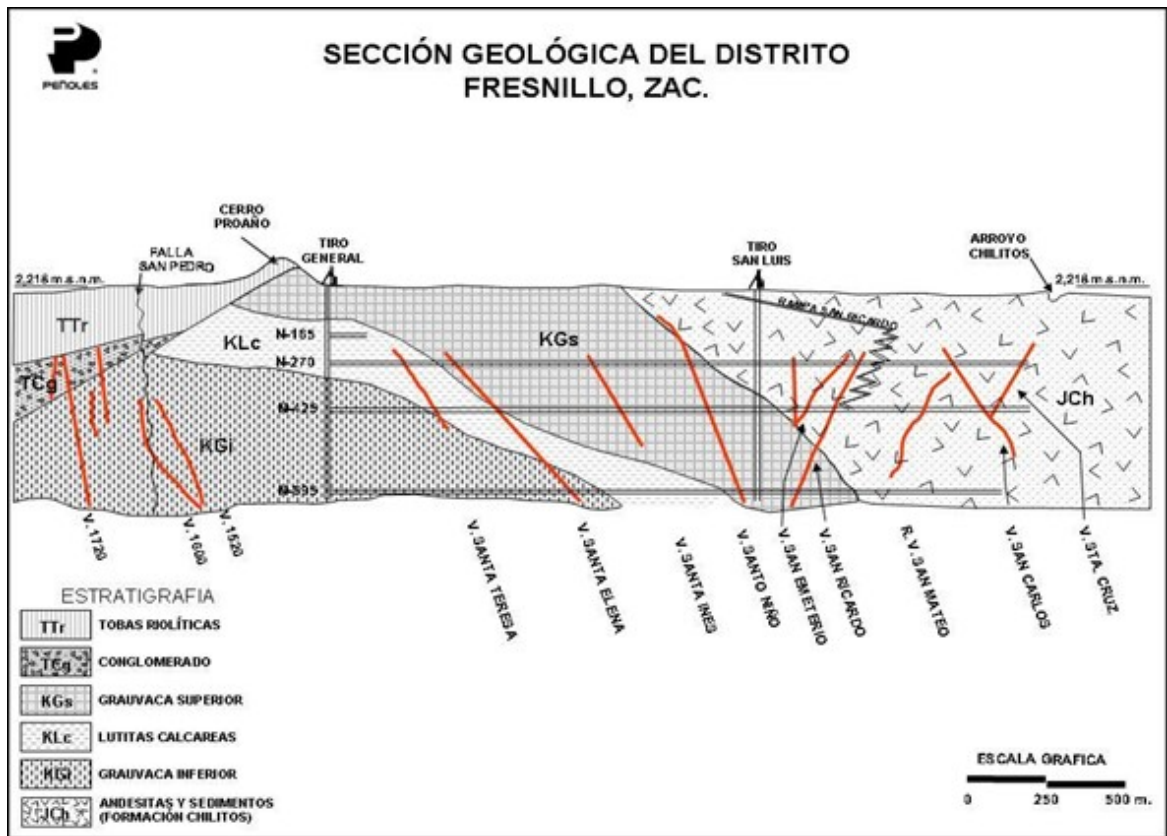


FIGURA 3.10: Sección geológica y principales vetas del Distrito Minero de Fresnillo.

4

OPERACIÓN EN MINERA FRESNILLO PLC

El ciclo simplificado de las operaciones mineras consiste a grandes rasgos en los siguientes procesos:

1. Gestión Ambiental y Permisos de Operación.
2. Exploración.
3. Preparación.
4. Desarrollo.
5. Explotación.
6. Extracción.
7. Beneficio/ Fundición.
8. Gestión Ambiental y Plan de Cierre.

En la Figura 4.1 se muestra un esquema simplificado del macroproceso de la operación minera que se lleva a cabo en la Unidad Minera de Fresnillo, consiste prácticamente en cuatro grandes procesos, dando inicio con la exploración, seguido de la extracción, después pasa por el proceso de beneficio que es en donde se obtienen los concentrados para finalmente ser enviado a la empresa Met-Mex Peñoles, empresa encargada del tratamiento final de los metales.



FIGURA 4.1: Esquema del macroproceso de operación minera en Minera Fresnillo.

4.1 Métodos de minado

Visto en el esquema anterior la operación minera, después del proceso de la exploración se procede con la actividad de la extracción. En este proceso es muy indispensable prestar atención a varios detalles para elegir de manera adecuada el mejor método de minado que se llevará a cabo en la zona que se tenga contemplada para realizar dicha actividad, porque desde una perspectiva económica debe proporcionar la mayor tasa de retorno de la inversión que se hizo en la operación minera. Existen varios métodos de minado que se emplean para la explotación minera y la elección del método está en función del tipo de yacimiento mineral que se vaya a explotar, de ahí la importancia de tener el yacimiento bien definido y caracterizado (litologías, geología estructural, alteraciones), además de contar con un modelo tridimensional del mismo. Desde otro punto de vista, el proceso de extracción debe cumplir con las mejores condiciones de seguridad y que faciliten la extracción del mineral a un ritmo eficiente considerando las condiciones geológicas del yacimiento.

Para la ingeniería geológica es de suma importancia conocer ciertas especificaciones, que se enlistan a continuación para poder elegir posteriormente, el mejor

método de minado que se adecue al tipo de yacimiento que se posea:

1. El tamaño y la morfología del cuerpo mineral.
2. El espesor y el tipo del encape superficial.
3. Localización, rumbo y buzamiento del depósito.
4. Las características físicas y la resistencia del mineral.
5. Las características físicas de la roca encajonante.
6. La presencia o ausencia de aguas subterráneas y sus condiciones hidráulicas relacionadas con el drenaje de las obras.
7. Los factores económicos involucrados con la operación, considerando la ley y el tipo de mineral, los costos comparativos de minado y ritmos de producción deseados.
8. Los factores ecológicos y ambientales, como la conservación del contorno topográfico original en el área de minado y prevención de que sustancias nocivas contaminen las aguas o la atmósfera (López, 1994).

Después de haber tomado en cuenta los puntos anteriores, es importante considerar la estrecha relación que tienen la ingeniería geológica con la mecánica de rocas, debido a que esta disciplina juega un papel fundamental para el análisis de los macizos rocosos, seleccionar el método de minado adecuado así determinar las sugerencias geotécnicas para lograr la estabilidad de la obra minera.

Los métodos de minado pueden ser superficiales o subterráneos y en función a eso se subclasifican como se enlistan a continuación (López, 1994):

1. Métodos de minado superficial:
 - a) Minado de placeres
 - b) Tajo abierto
 - c) Glory hole
2. Método de minado subterráneo:
 - a) Rebajes naturalmente soportados
 - I. Rebajes abiertos (rebajes individuales o múltiples)
 - II. Salones y pilares
 - III. Tumbes por subniveles
 - IV. Tumbes por carga

- V. Rebajes abiertos con “trancas” horizontales
- b) Rebajes artificialmente soportados
 - I. Corte y relleno
 - II. Cuadros conjugados (sin relleno o con relleno posterior)
 - III. Frentes largas
 - IV. Frentes cortas
 - V. Rebanadas descendientes*
- c) Rebajes de hundimiento
 - I. Hundimiento de subniveles
 - II. Hundimientos de bloques y paneles
- d) Rebajes con métodos combinados
(otros autores lo clasifican como rebajes de hundimiento)

En Minera Fresnillo los métodos de explotación que se llevan a cabo son: barrenación larga, corte y relleno, blanqueo y relleno. Dicho método es elegido después de contar con información del área en que se va a trabajar, en una reunión en donde participan los departamentos de planeación, mina y geología.

4.2 Estadísticas de producción

En la Figura 4.2 se muestra la producción en Minera Fresnillo registrada desde el año 1921 al 2004. Como se observa el yacimiento cuenta con diferentes tipos de mineralización en distintas estructuras con valores de mineral importantes y de interés para la empresa, por lo tanto, una caracterización de calidad de la mina es algo que le concierne para tener la mayor extracción de mineral posible, asegurando la estabilidad de la mina, que es bastante grande y de interés a nivel internacional.

PRODUCCIÓN DEL DISTRITO FRESNILLO DE 1921 A 2004						
MINERAL DE OXIDOS (1921-1943)						
TIPO DE MINERALIZACION	TON.	gr/ton.		%		
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu
STOCK WORK	13,044,400	0.30	190			
TOTAL MINERAL OXIDADO	13,044,400	0.30	190			
MINERAL DE SULFUROS (1926-2004)						
TIPO DE MINERALIZACION	TON.	gr/ton.		%		
		Au	Ag	Pb	Zn	Cu
SULFUROS DISEMINADOS	1,071,300	0.01	87	1.90	3.10	0.02
SKARN	2,120,100	0.01	67	2.60	5.00	0.12
VETAS SISTEMA NW-SE	19,891,504	0.73	306	3.10	3.94	0.36
VETAS SISTEMA E-W	13,019,778	0.75	751	0.46	0.90	0.02
2003 VETAS SISTEMA E-W	1,525,141	0.72	687	0.59	0.99	0.02
2004 VETAS SISTEMA E-W	1,645,937	0.72	632	0.57	1.03	0.02
TOTAL SULFUROS	39,273,760	0.68	463	1.96	2.73	0.20
	13,044,400	0.30	190			
GRAN TOTAL	52,318,160	0.58	395	1.47	2.05	0.15

TABLA-1

FIGURA 4.2: Producción de la mina en el Distrito Minero de Fresnillo (1921 – 2004).

5

METODOLOGÍA DE TRABAJO

5.1 Trabajo en campo

5.1.1 Equipo y material de trabajo

El material personal necesario para llevar a cabo las actividades en el interior de la mina se enlista en seguida y se muestra en la Figura 5.1:

- Equipo de protección personal (EPP)*
- Libreta de campo
- Brújula
- Flexómetro
- Cámara fotográfica
- Lápiz, bicolor y pluma
- Regla protractor
- Pintura en aerosol
- Lámpara de mano
- Planos topográficos en papel herculene
- Formatos para caracterizar el macizo rocoso



FIGURA 5.1: Equipo personal de trabajo para el interior de la mina.

* El EPP consiste en casco, lámpara para el casco, lentes de seguridad, protección auditiva, respirador, guantes, botas de hule y con casquillo, cinturón minero, línea de vida, arnés, overol con cinta reflectiva, autorescatador y detector de CO (Figura 5.2).



FIGURA 5.2: Equipo de protección personal de trabajo para el interior de la mina.

El equipo que se utilizó en brigada para trabajar en el interior de la mina y llegar a la zona de estudio, fue una camioneta del departamento de geología que por normatividad de la empresa cuenta con un extintor, torreta, cintas reflejantes, banderola luminiscente y una calza.



FIGURA 5.3: Camionetas del departamento de Geología de la mina.

El equipo que se requirió para trabajar en gabinete fue una computadora con los softwares *LeapFrog Geo*, *BricsCAD* y *Stereo32*, una regla protractor, los planos topográficos impresos con el levantamiento geológico-estructural marcado en el interior de la mina, hojas blancas y escuadras (Figura 5.4).

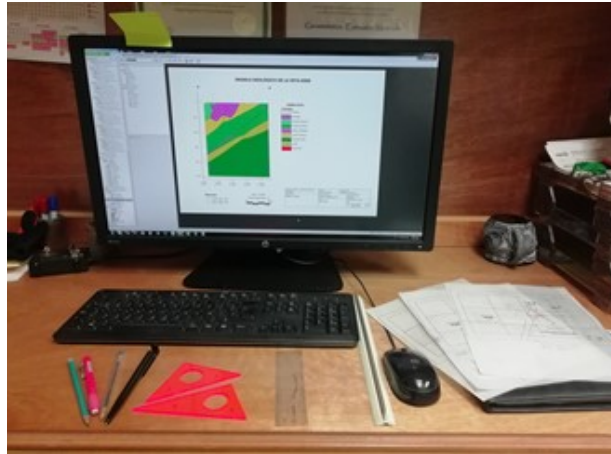


FIGURA 5.4: Equipo utilizado para trabajo de gabinete.

5.1.2 Mapeo geológico y estructural

Para realizar el mapeo geológico y estructural se visitó en varias ocasiones el área de estudio conforme el desarrollo de la obra avanzaba. El departamento de geología cuenta con 13 procedimientos para las actividades que se realizan, en cada uno de ellos se especifica el objetivo, alcance, responsabilidades, aspectos de seguridad, salud y medio ambiente, método, plan de reacción, registros, anexos y referencias. En la sección de método se definen los términos que se utilizarán más adelante para homologar a lo que se hace referencia y que sean entendidos cuando se lea el procedimiento, después se describe a detalle y con fotografías los pasos a seguir.

Para realizar el mapeo geológico-estructural en el área de estudio, se siguió la metodología del procedimiento *FRE-PO-10-05 "Levantamiento geológico en frentes y cruceros"*, para empezar, es necesario cumplir con las secciones 5.1 y 5.2 que a continuación se citan:

5.1 Traslado al lugar para el levantamiento.

1. Se hará de manera segura y ordenada, ya sea a pie o en vehículo.
2. El geólogo puede realizar el levantamiento solo, siempre que haya personal de mina que este laborando en el sitio.

5.2 Levantamiento.

El geólogo antes de entrar en la frente o crucero debe de preguntar al capitán del área en qué condiciones se presenta el lugar y si es posible su acceso.

1. El lugar debe de estar bien ventilado y amacizado totalmente.
2. Si detecta la presencia de CO a más de 100 ppm, salir inmediatamente y suspender la actividad temporalmente y/o esperar a que el lugar se ventile.
3. Antes de comenzar, deberá delimitarse el área a levantar y colocarse una barricada de seguridad acordonando la zona.
4. Se debe de amacizar cielo y tablas en caso de que sea necesario, poniendo mayor énfasis en zonas de fallas, cuartones abiertos o pequeñas rocas que pudieran ocasionar alguna lesión al personal.
5. Es necesario contar con el servicio de agua para lavar la obra hasta donde se vaya a realizar el levantamiento.
6. Lavar del tope hacia atrás, utilizando los lentes de seguridad, verificando la presencia de rocas o cuartones flojos u objetos que obstruyan el tránsito.
7. Realizar un reamacice manual en caso de ser necesario. (Leyva et al., 2015)

Las instrucciones anteriores son principalmente de seguridad y preparación del área en donde se va a realizar el levantamiento geológico, luego de haber cumplido con lo anterior, se procede con las siguientes instrucciones:

Realizar el levantamiento geológico.

1. Una vez lavado el lugar y re-amacizado, se puede iniciar el levantamiento geológico de la frente o crucero.
2. Comenzar marcando en las tablas las equidistancias del área a levantar, esto a criterio del geólogo (cada 2, 4 o 6 m).
3. Comenzar con el registro de estructuras (vetas, fracturas, fallas, alteraciones, etc.) y mediante el apoyo de una brújula, tomar registro de las inclinaciones.
4. Proyección de estructuras y toma de datos con brújula.
5. Anotación de datos y trazado de las estructuras geológicas.

6. Colocar anotaciones de inclinaciones de la veta, tanto del alto como del bajo en los costados de las tablas, en un área que sea visible para los operadores de jumbo.
7. Marcar o remarcar el área económica (veta) en el cielo de la obra.
8. Una vez concluida la actividad de levantamiento geológico, proceder a la recolección de materiales (cinta, aerosol, etc.) (Leyva et al., 2015).

De acuerdo con las normativas del departamento de geología del Distrito Minero de Fresnillo, para el paso dos se realizó una marca en las tablas (paredes laterales) de la obra minera del nivel 370 a cada dos metros (Figura 5.5). Una vez hecho el paso anterior se comenzó con la toma y registro de datos estructurales de la estructura mineralizada, fallas y fracturas en los planos impresos.



FIGURA 5.5: Marcado sistemático en las tablas de la obra minera como referencia para realizar el mapeo geológico-estructural.

La toma de datos para las estructuras mineralizadas, fallas y fracturas se realizó con el apoyo de una brújula brunton y un flexómetro. Para ello, primero se tomó el flexómetro para extenderlo con ambas manos y se hizo coincidir con la sombra de éste y la estructura mineralizada (Figura 5.6). Una vez logrado eso, se tomó el ángulo de la inclinación de la estructura mineralizada (Figura 5.7). La proyección de la estructura se hizo a la altura de la cintura y de ahí se tomó la distancia a la que estaba de la tabla derecha o izquierda, dependiendo del buzamiento de la estructura mineralizada.



FIGURA 5.6: Proyección y alineación de la sombra del flexómetro con la veta.



FIGURA 5.7: Toma del dato y registro del ángulo de inclinación de la estructura mineralizada.

El registro del mapeo geológico y estructural se realizó utilizando planos con la topografía del área de trabajo y las coordenadas locales de la mina impresos en papel herculene, esto con el fin de conservar los trazos y anotaciones dentro de la mina, en el área de estudio, donde hay mucha humedad y en ocasiones goteras. Para homologar la actividad del mapeo geológico y estructural en el departamento de geología, se utilizó un lápiz bicolor para marcar de color rojo, estructuras mineralizadas y de color azul las estructuras como fallas y fracturas. Para las litologías cabe mencionar que se tiene un color asignado para cada una de ellas. Se coloreó en el mapa con el

color correspondiente a la litología del área mapeada como se visualiza en la Figura 5.8. También, se realizaron anotaciones extra en el mapa sobre la mineralización y se tomó el dato estructural de la estratificación en algunos puntos del área de estudio.

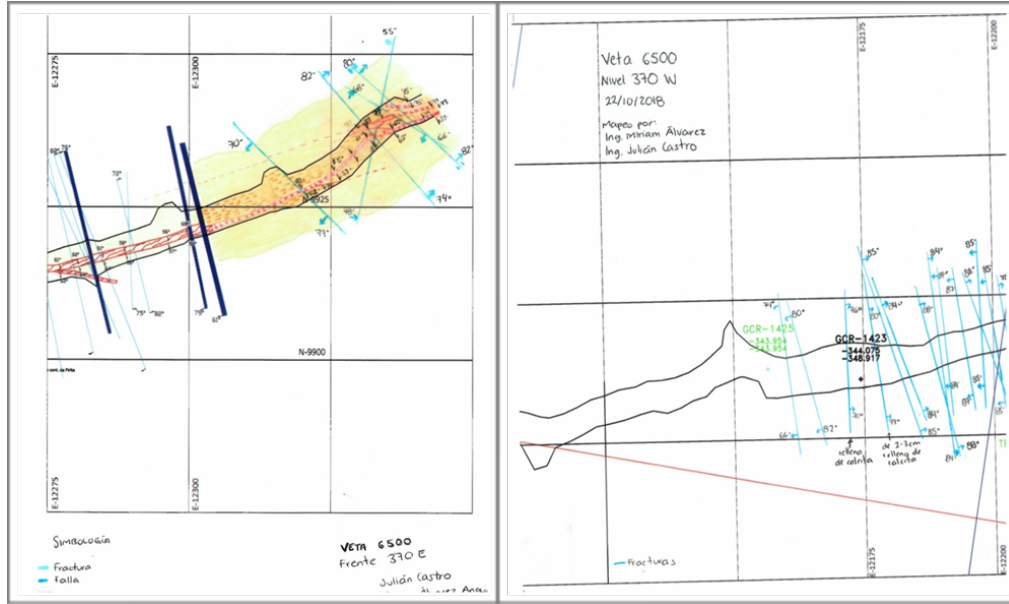


FIGURA 5.8: Registro del mapeo geológico y estructural en el interior de la mina.



FIGURA 5.9: Mapeo de la veta 6500 y fracturas en el interior de la mina.

5.1.3 Caracterización del macizo rocoso (RMR y Q)

La caracterización del macizo rocoso se llevó a cabo en dos niveles del área de estudio. Se realizaron tres ventanas geotécnicas en el área de la veta 6500: una en el nivel 440, al poniente del rebaje, y dos en el nivel 370, al oriente y al poniente del rebaje. Se marcó en los planos del nivel 370 y 440 la ubicación donde fueron realizadas las ventanas geotécnicas. A fin de caracterizar el macizo rocoso, primero se procedió a marcar con aerosol de color rojo la ventana geotécnica, es decir, un cuadrado de dimensiones de 1 m por lado en la tabla del desarrollo de la obra minera (Figura 5.10).



FIGURA 5.10: Registro del mapeo geológico y estructural en el interior de la mina.

Posteriormente se trazó una línea horizontal que dividiera el metro cuadrado en dos partes, sobre la cual se hizo la descripción del macizo rocoso, para ello se empleó un formato impreso en cada una de las ventanas geotécnicas. El formato contiene una tabla dividida en varios renglones y columnas, en la primera columna se encuentran los rubros a caracterizar y en las siguientes los rangos de valores de dichos para calificar los rubros, cada rango tiene asignado un valor en puntos de acuerdo con el RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989). Finalmente, se sumó el puntaje y se determinó la clasificación del macizo rocoso para cada ventana geotécnica con base al RMR.

5.2 Trabajo de gabinete

5.2.1 Digitalización del mapeo en los planos topográficos

Cada vez que se visitó el área de estudio para hacer el mapeo geológico y estructural, se procedió a actualizar los planos geológicos del respectivo nivel de la obra minera en el departamento de geología. Primero, se escaneó la hoja donde se realizó el mapeo geológico y estructural en el interior de la mina para ajustarlo a la escala correspondiente de los planos topográficos y geológicos del área mapeada en los archivos digitales. El software empleado para hacer la digitalización del mapeo fue *BricsCAD*. El departamento de geología organiza los archivos digitales de mapeo geológico y estructural por área del Distrito Minero de Fresnillo y por sus niveles de desarrollo de obra minera. En los archivos digitales que se realizan se tiene una capa para ingresar y actualizar datos para cada atributo necesario, por ejemplo, se tiene una capa para echados, estructuras mineralizadas, fracturas, fallas, y litología.

5.2.2 Análisis estructural

Con los datos estructurales de fracturas y fallas mapeados en el área de estudio en el interior de la mina se realizó el análisis estructural. Primeramente, con los mapas elaborados en el nivel 370 de la Veta 6500, se determinó manualmente el valor de la dirección (rumbo) de las fallas y fracturas con notación azimutal. Después se elaboró una base de datos en una hoja de cálculo del programa *Microsoft Excel* con los datos de rumbo e inclinación (echado) tomados en el interior de la mina, cabe mencionar que en algunos casos el valor de inclinación variaba en cada extremo de la obra minera, optándose por hacer un promedio y utilizar ese valor.

Adicionalmente, se complementó la base de datos con una columna en la que se determinó la dirección del echado, dado que fue necesario al momento de cargar los datos a los softwares (Véase Anexo A).

El vector de esfuerzos principales se determina al encontrar el plano perpendicular al plano promedio de las estructuras, en este caso de las fallas y fracturas. Es importante mencionar que el vector de esfuerzos obtenido hace referencia a los esfuerzos que actuaron en un determinado momento del tiempo geológico y que dieron origen a dichas discontinuidades, es posible que en la actualidad el estado de esfuerzo sea diferente y para conocerlo es necesario utilizar instrumentación de mecánica de rocas.

La finalidad de realizar el análisis estructural fue encontrar el vector de esfuerzos principales y comparar los resultados obtenidos con dos softwares. En *Leapfrog Geo* se obtuvo el resultado del vector de esfuerzos mediante un modelado numérico

mientras que, con el software *Stereo32*, se determinó de forma manual. En el caso del vector resultante empleando *Stereo32*, se buscó que la traza ciclográfica coincidiera con el promedio de la distribución de los polos de todos los datos estructurales de las fallas y fracturas. Al comparar los resultados, el vector más coherente fue el que se determinó manualmente. Cabe mencionar que para determinar la traza ciclográfica promedio, existen softwares que obtienen el resultado probabilísticamente, pero se decidió hacerlo de manera manual y con criterio visual.

A continuación, se muestra en la Figura 5.11 el resultado del análisis estructural en la red estereográfica en los softwares empleados.

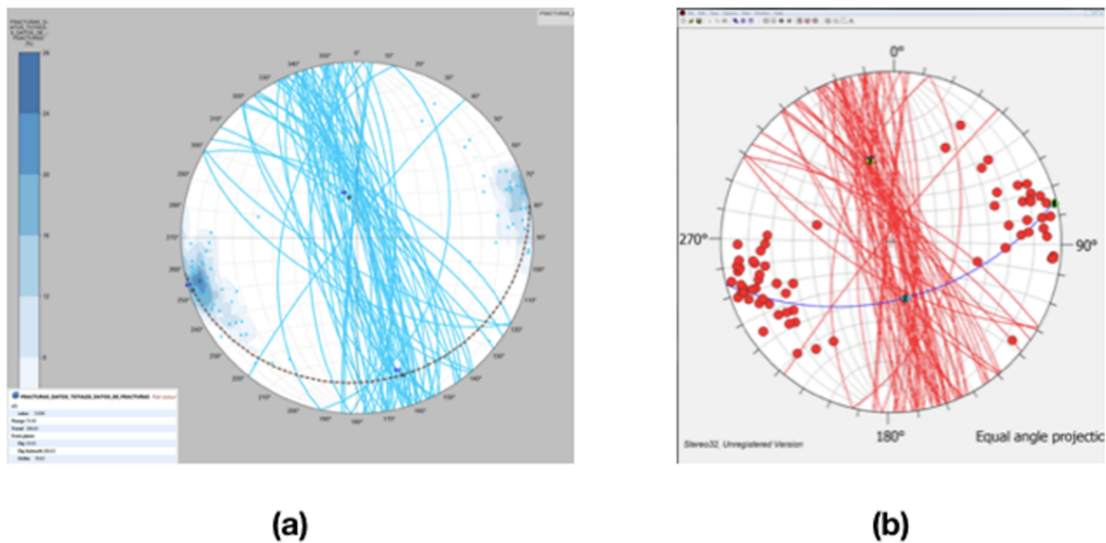


FIGURA 5.11: Vista de resultados del análisis estructural en diferentes softwares (a) Leapfrog Geo, (b) Stereo32.

5.2.3 Modelo geológico-estructural de la veta 6500

Para la creación del modelo geológico-estructural fue necesario realizar varias actividades previas. Primero, se solicitó información de 28 barrenos de superficie al área de geología de exploración, ya que era indispensable contar con esos datos para generar el modelo geológico-estructural en el software *Leapfrog Geo*. Luego de obtener la base de datos de cada uno de los barrenos, se hizo un procesamiento de los datos para obtener una validación y corrección de estos, debido a que existían algunos campos vacíos e inconsistencias en varios datos, razón por la cual se creó una nueva base de datos para cada barreno haciendo las respectivas consideraciones. Se obtuvo como resultado una base de datos general de todos los barrenos y se procedió a cargarla en el programa *Leapfrog Geo* para comenzar el modelado.

Una vez cargada la base de datos, con base a la columna litológica descrita por el personal de exploración se procedió a categorizar las litologías en grupos principales: aluvi3n, andesita, arenisca superior e inferior, arenisca-lutita, lutita y lutita-arenisca, esto con el fin de obtener un modelo del sector poniente de Minera Fresnillo, sitio donde se localiza la zona de estudio. Luego de categorizar las litologías mediante el análisis visual de las mismas en los barrenos de superficie y con criterio geol3gico, se implement3 una nueva categorizaci3n m3s refinada considerando tambi3n la cronología de las litologías y eventos geol3gicos. Hecho lo anterior se gener3 el modelo geol3gico con las herramientas de modelamiento de *Leapfrog Geo* (Fast Radial Function), en la Figura 5.12 se puede apreciar en pasos simplificados la obtenci3n de este.

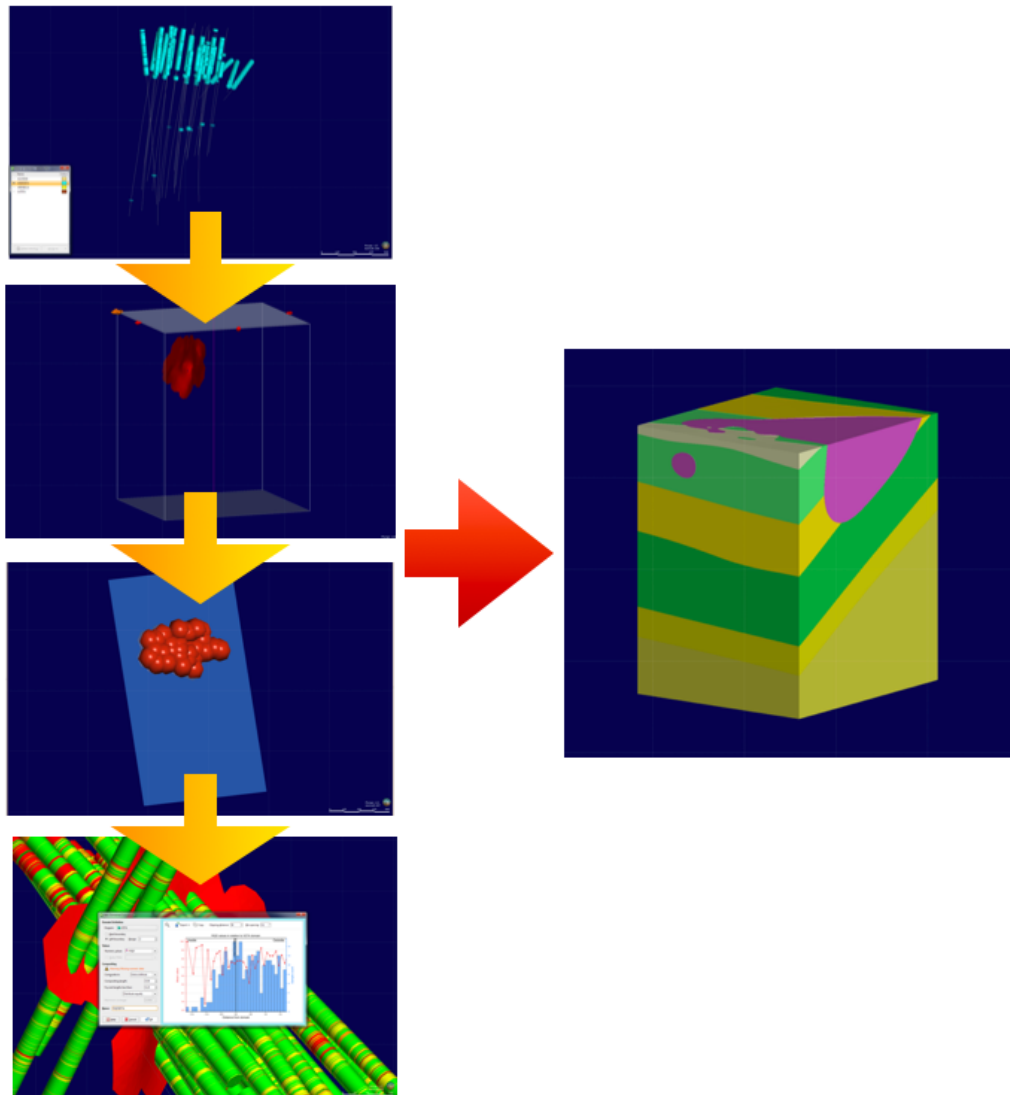


FIGURA 5.12: Proceso para la generaci3n del modelo geol3gico.

Como herramienta complementaria, se generó un modelo numérico de la variable RQD de los barrenos de superficie utilizados para caracterizar con base a ello el macizo rocoso. Como se aprecia en la Figura 5.13, cada una de las diferentes litologías posee una distribución estadística propia por lo que se procedió a generar la interpolación por dominios para desagrupar las familias estadísticas, utilizando barreras duras.

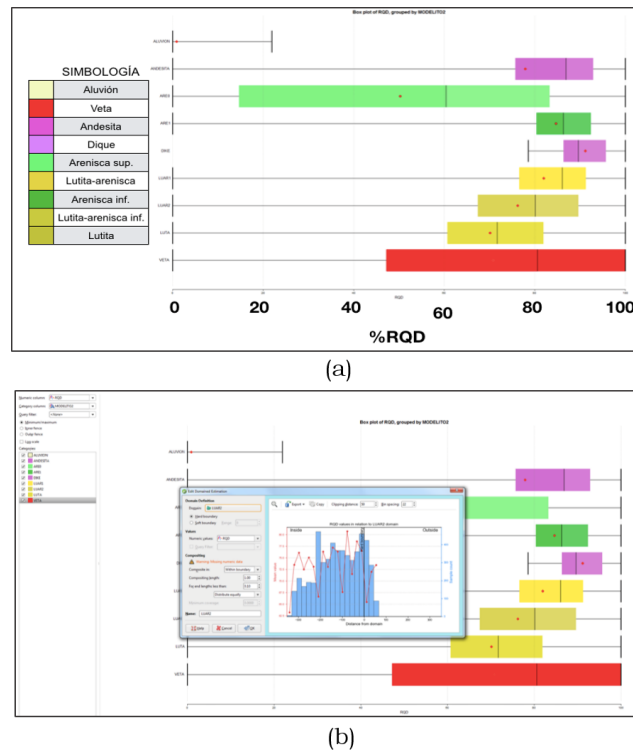


FIGURA 5.13: (a) Distribución estadística de cada litología (b) Estadística del dominio de una litología (Lu-ar)

Al modelo geológico con la estructura mineralizada obtenido se le agregó la base de datos de las fallas mapeadas en el nivel 370 con el objetivo de realizar una sección longitudinal en el rebaje del nivel 370 de la Veta 6500 y para identificar zonas de riesgo. Durante el proceso de esta actividad y antes de obtener las secciones geológicas en *Leapfrog Geo* se recibió apoyo y asesoría para la interpretación estructural del área de estudio (Figura 5.14).



FIGURA 5.14: Asesoría para la interpretación de datos y secciones geológicas.

5.2.4 Clasificación del macizo rocoso

Una vez realizada la caracterización del macizo rocoso determinado con las ventanas geotécnicas en la zona de estudio, se consultó el valor de la resistencia a la compresión simple para la litología del área de San Carlos. En el año 2014, la empresa AMC Consultants, obtuvo el valor de 75 MPa para dicha litología, valor con el cual se completaron los formatos de levantamiento geomecánico (Véase Anexo B).

Asimismo, se calculó el valor del índice de Q de Barton para hacer una comparación de la categoría del tipo de macizo rocoso con el dato de RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski obtenido para cada ventana geotécnica, y finalmente dar una recomendación geotécnica de la zona de estudio. Es importante mencionar que en un estudio consultado de caracterización del macizo rocoso por áreas operativas de la Unidad Minera Fresnillo, realizado en el año 2014, clasifica el área de San Carlos, donde se encuentra la Veta 6500, como un macizo rocoso de buena calidad y con base al índice Q, se clasificó de tipo regular; estos datos sirvieron como patrón de comparación de los resultados obtenidos en este proyecto en primera instancia.

6

RESULTADOS

Los resultados obtenidos del presente trabajo son la integración de las actividades realizadas en campo y gabinete. A continuación, se muestran y describen los datos y productos obtenidos.

Se realizó la digitalización y actualización de los planos del desarrollo minero del nivel 370 de la Veta 6500 con los mapeos geológicos hechos en cada visita en donde se registran las litologías del sitio, fallas, fracturas y la estructura mineralizada. (Véase Anexo C).

Con respecto al análisis estructural se determinó el vector de los esfuerzos principales que en determinado tiempo geológico dieron origen a las discontinuidades existentes en la zona de estudio cuyo resultado se presenta en la Tabla 6.1.

Esfuerzos principales	Trend	Plunge
S1	347.80°	68.90°
S2	166.88°	21.10°
S3	255.88°	0.92°

TABLA 6.1: Resultado de los esfuerzos principales en un determinado momento geológico.

En la Figura 6.1 se muestra el estereograma empleando el software *Stereo32* de las fracturas y fallas registradas en campo. Además, con las trazas ciclográficas de fallas y fracturas se distinguió una familia estructural con una orientación preferencial de NW/SE.

Se realizó un modelo geológico en 3D representando, en orden cronoestratigráfico, las siguientes litologías: aluviación, andesita, arenisca superior, lutita-arenisca, arenisca inferior, lutita-arenisca inferior y lutita, las cuales fueron categorizadas al generar el modelo, además contiene la estructura mineralizada, la Veta 6500, y un dique (Figura 6.2).

Con las herramientas del software *Leapfrog Geo*, y con una vista en planta de la superficie superior del modelo, se trazó una línea del punto A a B para obtener una sección geológica, la cual fue perpendicular a la Veta 6500 (Figura 6.3).

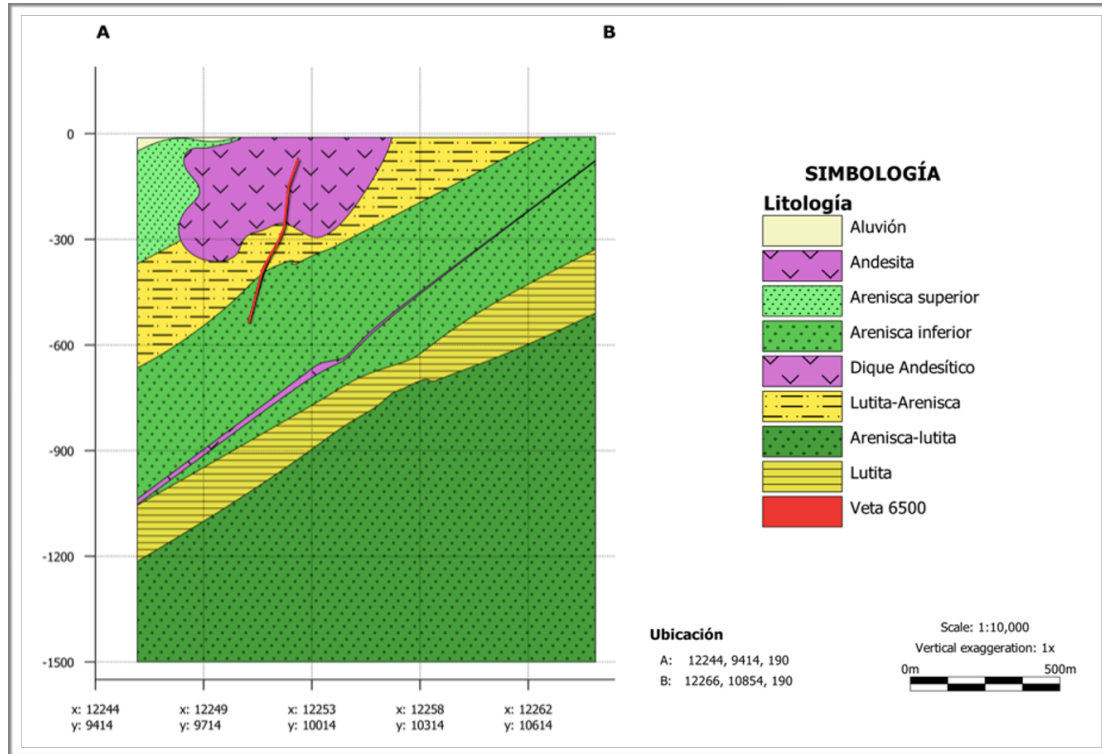


FIGURA 6.3: Secci3n geol3gica A-B en el modelo geol3gico de la Veta 6500.

El modelo num3rico con base al RQD de los barrenos de exploraci3n y la proyecci3n de las fallas en el nivel 370 de la Veta 6500 result3 como se muestra en la Figura 6.4. En la parte superior derecha de la figura se localiza la simbología en la que hay un color asignado para cada rango de porcentaje de RQD que indica la calidad de la roca.

Se realiz3 una secci3n en el modelo del RQD y se aÑadi3 la obra de desarrollo minero del nivel 370, con ello se logr3 observar que las zonas con valores m3s bajos de porcentaje de RQD, categorizadas como zonas de mala y muy mala calidad de roca, coincidieron con las zonas donde se concentran los planos de fallas y/o hay intersecci3n entre ellas (Figura 6.5).

Se realizaron varias secciones transversales y se introdujo al modelo un plano con la orientaci3n de la estratificaci3n (N86°E/35° NW) que se tom3 en el nivel 440 de la zona de estudio, con el objetivo de tener una mejor visualizaci3n de las zonas

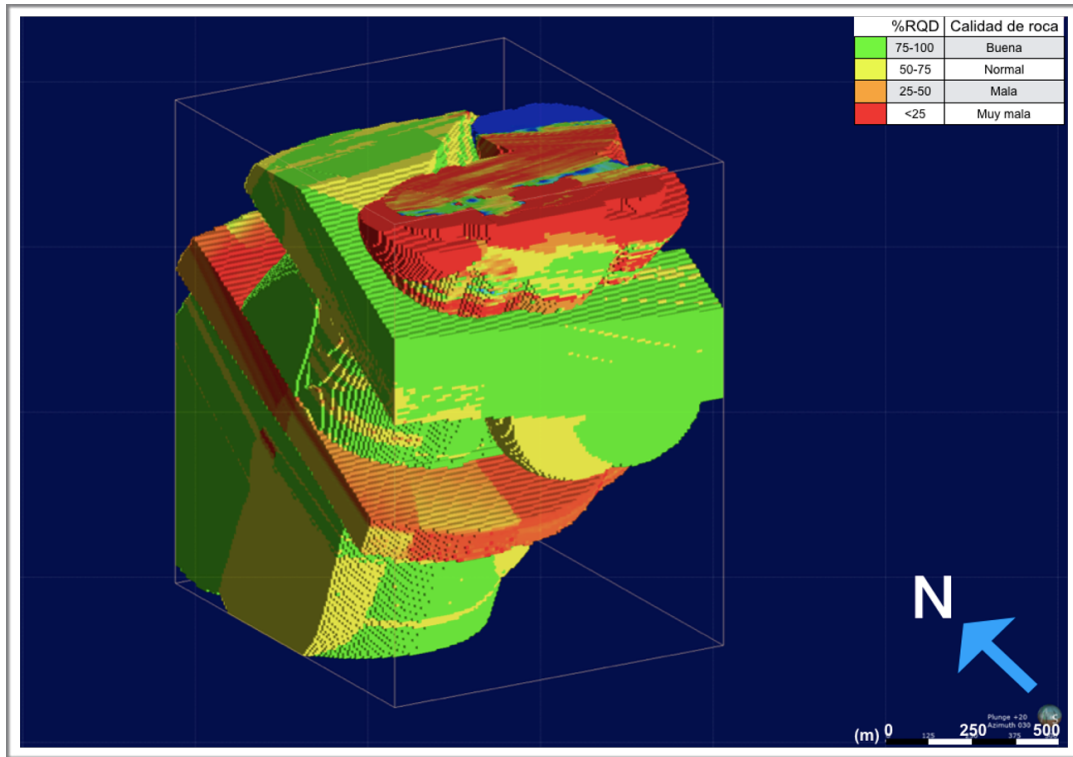


FIGURA 6.4: Modelo numérico con base al RQD de las litologías

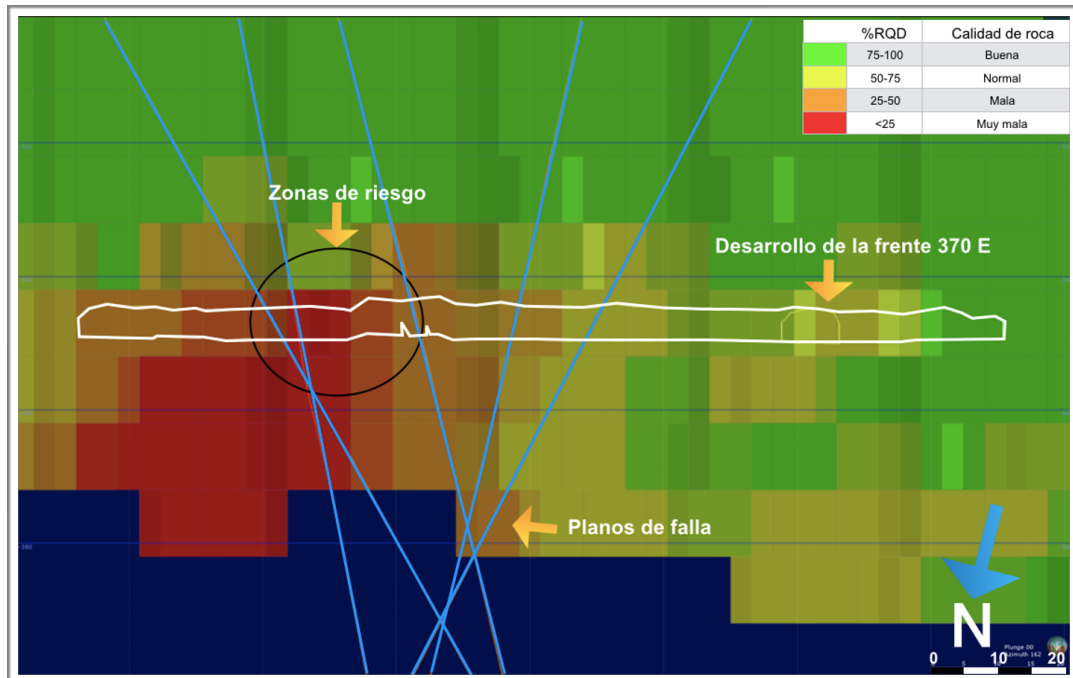
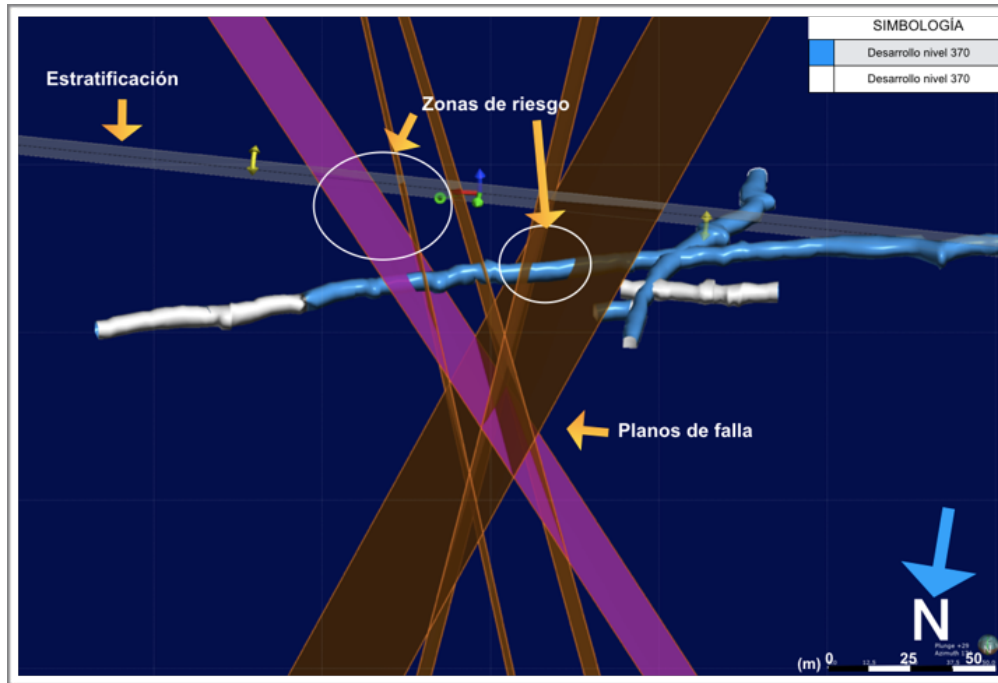
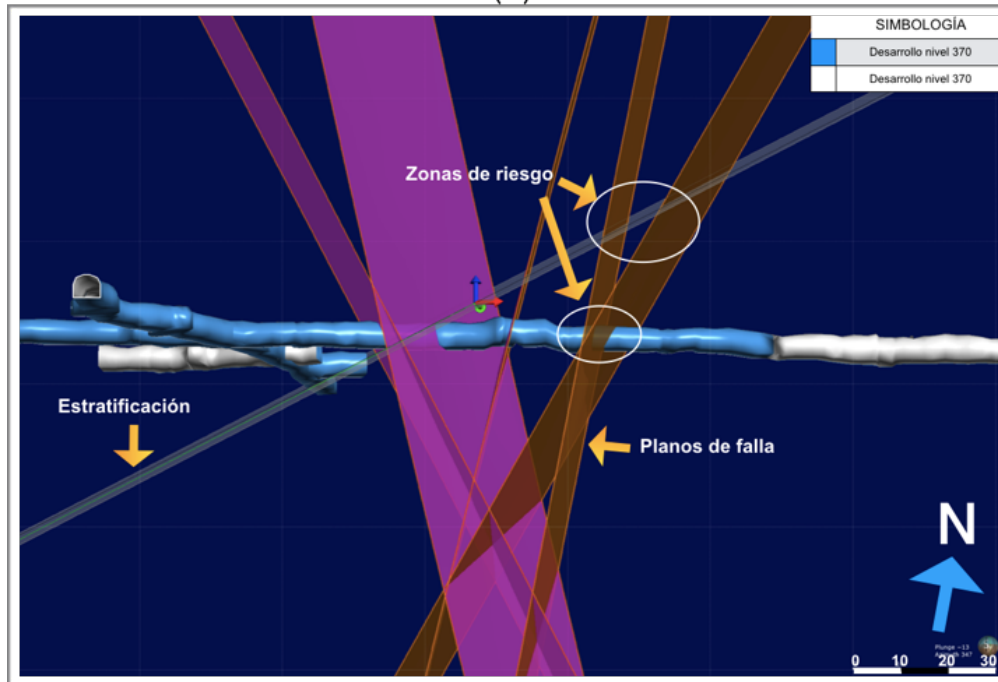


FIGURA 6.5: Sección transversal del modelo con base al RQD y ubicación del nivel 370.

de riesgo que se forman con la intersección de los planos de falla y el plano de la estratificación (Figura 6.6).



(a)



(b)

FIGURA 6.6: Secciones longitudinales y zonas de riesgo en el nivel 370 (a) y (b).

Con respecto a los valores RMR obtenidos de las ventanas geotécnicas se tomó como referencia la siguiente ecuación de los autores Cameron-Clarke y Budavari (1981) para determinar el valor de Q:

$$RMR = 5\ln(Q) + 60.8 \quad (6.1)$$

Una vez realizado el despeje de la variable Q de la Ecuación 6.1 se calculó el valor para cada ventana como se muestra en la Tabla 6.2, donde además se define la clase de macizo rocoso. Posteriormente se procedió a graficar dichos valores en un diagrama para conocer la categoría de sostenimiento correspondiente a partir del índice Q (Barton,2000). Para lo anterior se consideró un valor de 4.5 m para la altura de la obra y un valor de ESR (Relación de soporte de excavación) de 2, con categoría de excavación de labores mineras de carácter temporal.

Ventana	Ubicación	RMR(Bieniawski,1989)	Clase de macizo rocoso	Cameron-Clarke and Budavari (1981)
V1	370 W	52	III(Regular)	0.17
V2	440 E	59	III(Regular)	0.70
V3	440 W	61	II(Buena)	1.04

TABLA 6.2: Resultados de ventanas geotécnicas y clasificación del macizo rocoso.

Finalmente, considerando los resultados obtenidos en el diagrama (Figura 6.7), la recomendación geotécnica que se determinó para el reforzamiento temporal de la obra en el nivel 370 de la Veta 6500 con base al índice Q, es un sistema de anclaje sistemático de 1.20 x 1.20 m, a tresbolillo, con ancla de varilla corrugada y de 16 mm de diámetro. No obstante, si el frente se desea conservar indefinidamente, con fines de exploración o tránsito, es recomendable llevar a cabo un reforzamiento con base en un análisis exhaustivo con mediciones in situ sobre la deformabilidad del macizo rocoso en esa zona.

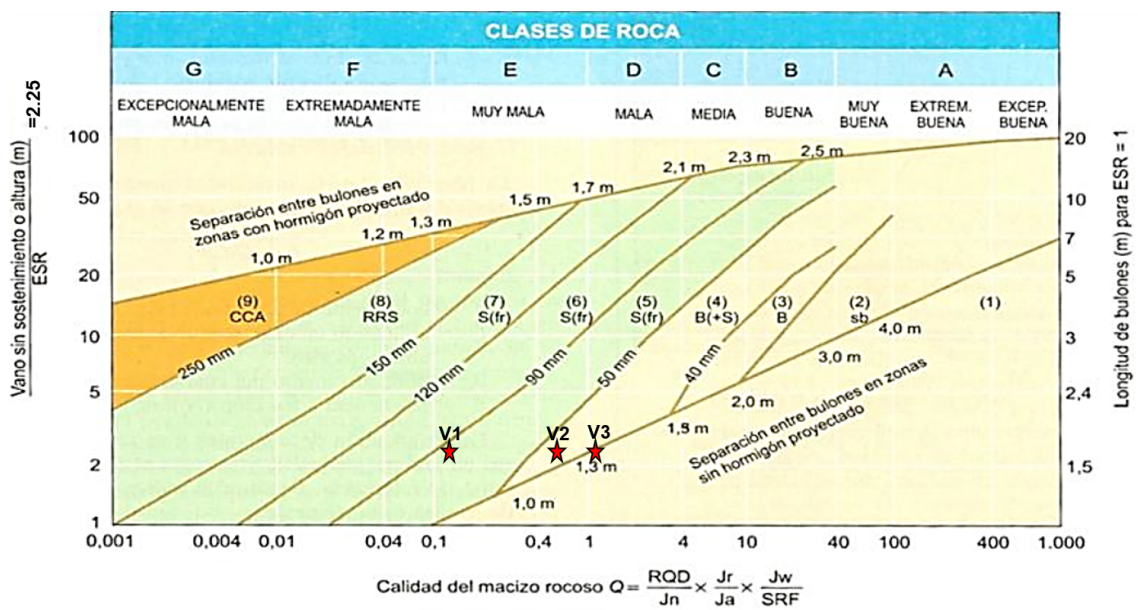


FIGURA 6.7: Diagrama para determinar la categoría de sostenimiento tomando en cuenta los valores del índice Q de Barton (2000). (Modificado de González de Vallejo et al. (2002))

7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para finalizar, del levantamiento geológico estructural y geotécnico realizado en el desarrollo minero del nivel 370 del sector oriente del Distrito Minero de Fresnillo se consiguieron las siguientes conclusiones:

- ▶ Se cumplió con el objetivo de realizar un modelo geológico, donde se definieron además de la Veta 6500 y el dique para el área de estudio, las siguientes litologías: aluvión, andesita, arenisca superior, lutita-arenisca, arenisca inferior, lutita-arenisca inferior y lutita. Se concluyó que para tener un modelo geológico de mayor precisión es necesario que la información de la base de datos de los barrenos de superficie esté validada y los datos no presenten inconsistencias, de lo contrario el nivel de certeza del modelo se vería afectado. Se recomienda también, hacer el respectivo ajuste para los rubros que ameriten limitaciones de valores en el software empleado por el área de geología de exploración para la descripción de núcleos.
- ▶ Del análisis estructural se determinó el vector de esfuerzos principales con los valores de S_1 ($347.80^\circ/68.90^\circ$), S_2 ($166.88^\circ/21.10^\circ$) y S_3 ($255.88^\circ, 0.92^\circ$). Se propone realizar un análisis estructural donde se contemplen los datos estructurales de las vetas de Minera Fresnillo, en vista de que los datos empleados para este análisis tienen una orientación perpendicular a la orientación éstas.
- ▶ Se comprueba que la metodología de interpolación usada para el modelado en el software *Leapfrog Geo* con base al RQD de la roca, fue adecuada teniendo en cuenta que en el desarrollo de la obra minera en el nivel 370 los valores más bajos del RQD correspondieron a las zonas de riesgo puesto que coincidían con la ubicación de los planos de fallas o a la formación de bloques o cuñas que pudieran ocasionar un daño a la obra minera.

- ▶ La metodología empleada para realizar las ventanas geotécnicas y caracterizar el macizo rocoso arrojó como resultado que la calidad del macizo rocoso de la zona de estudio de acuerdo con el RMR corresponde en promedio a la clase III, es decir, de calidad regular. Además, con los resultados del cálculo del índice de Q fue posible dar una recomendación para el sostenimiento temporal de la obra, sin embargo, se sugiere tener más datos para tener mayor certeza de los resultados y que si se desea conservar indefinidamente, con fines de exploración o tránsito, es recomendable llevar a cabo un reforzamiento con base en un análisis exhaustivo con mediciones in situ sobre la deformabilidad del macizo rocoso en esta zona. Se propone implementar dicha metodología en cada nivel de la mina para tener una mejor caracterización del macizo rocoso, además tener identificados puntos de control del para crear un modelo con base a este parámetro.
- ▶ La integración de los datos estructurales como fallas y fracturas al modelo del RQD del macizo rocoso permitió visualizar la posible formación de cuñas por la intersección del sistema de fracturas ya sea con las fallas o la estratificación y, por ende, identificar zonas de riesgo, resaltando la importancia de actualizar los datos estructurales en cada corte del rebaje para determinar si se presentan cambios en la orientación del sistema de fracturas o de la estratificación.
- ▶ Finalmente se determinó que reconocer una zona de riesgo previamente permite tomar en cuenta las decisiones y acciones pertinentes al momento de realizar el minado para dar estabilidad al rebaje, elegir el método de minado correcto, así como establecer la orientación de la barrenación para una mayor estabilidad y seguridad.

A

DATOS ESTRUCTURALES DE FALLAS Y FRACTURAS DEL NIVEL 370 (VETA 6500)

FALLA	STRIKE	DIP	DIP DIR
F1	350°	61°	80°
F2	4°	78°	94°
F3	165°	76°	255°
F4	166°	79°	256°
F5	165°	61°	255°

FRACTURA	STRIKE	DIP	DIP DIR
1	324°	85°	54°
2	185°	87°	275°
3	184°	87.5°	274°
4	326°	76.5°	56°
5	334°	81°	64°
6	332°	77.5°	62°
7	342°	84.5°	72°
8	333°	69°	63°
9	324°	70°	54°
10	336°	64°	66°
11	335°	79°	65°
12	343°	78°	73°
13	339°	71°	69°
14	343°	85°	73°
15	350°	78°	80°

FRACTURA	STRIKE	DIP	DIP DIR
16	348°	85°	78°
17	165°	86.5°	255°
18	160°	82°	250°
19	154°	69°	244°
20	156°	82°	246°
21	176°	75°	266°
22	345°	77°	75°
23	139°	73.5°	229°
24	192°	55°	282°
25	12°	48°	102°
26	316°	74°	78°
27	309°	81°	39°
28	119°	65°	209°
29	299°	68°	29°
30	340°	86°	70°
31	339°	87.5°	69°
32	349°	84°	79°
33	350°	85°	80°
34	185°	87°	275°
35	218°	85°	308°
36	185°	87.5°	275°
37	325°	73°	55°
38	2°	72°	92°
39	182°	68°	272°
40	175°	78°	265°
41	355°	75°	85°
42	170°	84°	260°
43	358°	84°	88°
44	162°	78°	252°
45	162°	81°	252°
46	340°	80°	70°
47	319°	72.5°	49°
48	304°	75°	34°
49	320°	75°	50°
50	140°	69°	230°

FRACTURA	STRIKE	DIP	DIP DIR
51	130°	77°	210°
52	155°	78.5°	245°
53	160°	65.5°	250°
54	171°	70°	261°
55	163°	81°	253°
56	358°	73°	88°
57	351°	78.5°	81°
58	340°	85°	70°
59	337°	84°	67°
60	345°	88°	75°
61	352°	84°	264°
62	174°	84°	264°
63	170°	87°	260°
64	340°	81.5°	70°
65	177°	85°	267°
66	162°	85°	252°
67	170°	78°	260°

B

**FORMATOS DE LEVANTAMIENTO
GEOMECÁNICO**

FORMATO DE LEVANTAMIENTO GEOMECÁNICO.
CLASIFICACIÓN ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI, 1989)

Mina: Unidad Minera Proaño
Obra: N-370 W Veta 6500
Ancho*alto: 4.5 x 4 m
Descripción de la roca: Lutita-arenisca

Área: San Carlos
Rumbo de obra: ~N78°W
Elaboró: Miriam A. y Ing. Julián C.

Fecha: 18/11/2018
Dimensiones: 1 x 1 m
Ventana: 1

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
PARÁMETRO		RANGO DE VALORES Y VALORACIONES						VALORACIÓN	
RESIST. COMP. UNIAxIAL (M Pa)		>250 (15)	100-250 (12)	<input checked="" type="checkbox"/> 50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	1	7	
RQD % 64		90-100 (20)	75-90 (17)	<input checked="" type="checkbox"/> 50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	2	1	
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06-0.2 (8)	< 0.06 (5)	3	8	
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	<input checked="" type="checkbox"/> 1-3 m Long. (4)	3-10mm (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	4A	4	
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	<input checked="" type="checkbox"/> 1- 5 mm (1)	> 5 mm (0)	4B	1	
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	<input checked="" type="checkbox"/> Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C	3	
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	<input checked="" type="checkbox"/> Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4D	1	
	ALTERACIÓN	Sana (6)	<input checked="" type="checkbox"/> Lig. Alterada. (5)	Mod.Alterada (3)	Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E	5	
AGUA SUBTERRÁNEA		<input checked="" type="checkbox"/> Seco (15)	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5	7	
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) = 57-5									
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	II		
DESCRIPCIÓN		I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA	52		

Rumbo perpendicular al eje de la excavacion				Rumbo paralelo al eje de la excavacion		Buzamiento 0°-20° independiente del rumbo
Direccion con el buzamiento		Direccion contra el buzamiento				
Bz 45°-90°	Bz 20°-45°	Bz 45°-90°	Bz 20°-45°	Bz 45°-90°	Bz 20°-45°	
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable	Regular	Desfavorable
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10

FORMATO DE LEVANTAMIENTO GEOMECÁNICO.
CLASIFICACIÓN ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI, 1989)

Mina: Unidad Minera Proaño

Área: San Carlos

Fecha:

Obra: N-440 E Veta 6500

Rumbo de obra: ~N80°W

Dimensiones: 1 x 1 m

Ancho*alto: 4.5 x 4 m

Elaboró: Miriam A. y Ing. Julián C.

Ventana: 2

Descripción de la roca: Lutita-arenisca

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
PARÁMETRO		RANGO DE VALORES Y VALORACIONES						VALORACIÓN	
RESIST. COMP. UNIAxIAL (M Pa)		>250 (15)	100-250 (12)	<input checked="" type="checkbox"/> 50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	1	7	
RQD %	87	90-100 (20)	<input checked="" type="checkbox"/> 75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	2	17	
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,06-0,2 (8)	< 0,06 (5)	3	8	
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	<input checked="" type="checkbox"/> 1-3 m Long. (4)	3-10mm (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	4A	4	
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	<input checked="" type="checkbox"/> 1- 5 mm (1)	> 5 mm (0)	4B	1	
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	<input checked="" type="checkbox"/> Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C	3	
	RELLENO	Limpia (6)	<input checked="" type="checkbox"/> Duro < 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4D	4	
	ALTERACIÓN	Sana (6)	<input checked="" type="checkbox"/> Lig. Alterada. (5)	Mod.Alterada (3)	Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E	5	
AGUA SUBTERRÁNEA		Seco (15)	<input checked="" type="checkbox"/> Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5	10	
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) = 59-0									
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0			II
DESCRIPCIÓN		I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA			59

Rumbo perpendicular al eje de la excavacion				Rumbo paralelo al eje de la excavacion		Buzamiento 0°-20° independiente e del rumbo
Direccion con el buzamiento		Direccion contra el buzamiento				
Bz	Bz	Bz	Bz	Bz	Bz	
45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable	Regular	Desfavorable
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10

FORMATO DE LEVANTAMIENTO GEOMECÁNICO.
CLASIFICACIÓN ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI, 1989)

Mina: Unidad Minera Proaño
Obra: N-440 W Veta 6500
Ancho*alto: 4.5 x 4 m
Descripción de la roca: Lutita-arenisca

Área: San Carlos
Rumbo de obra: ~N80°W
Elaboró: Miriam A. y Ing. Julián C.

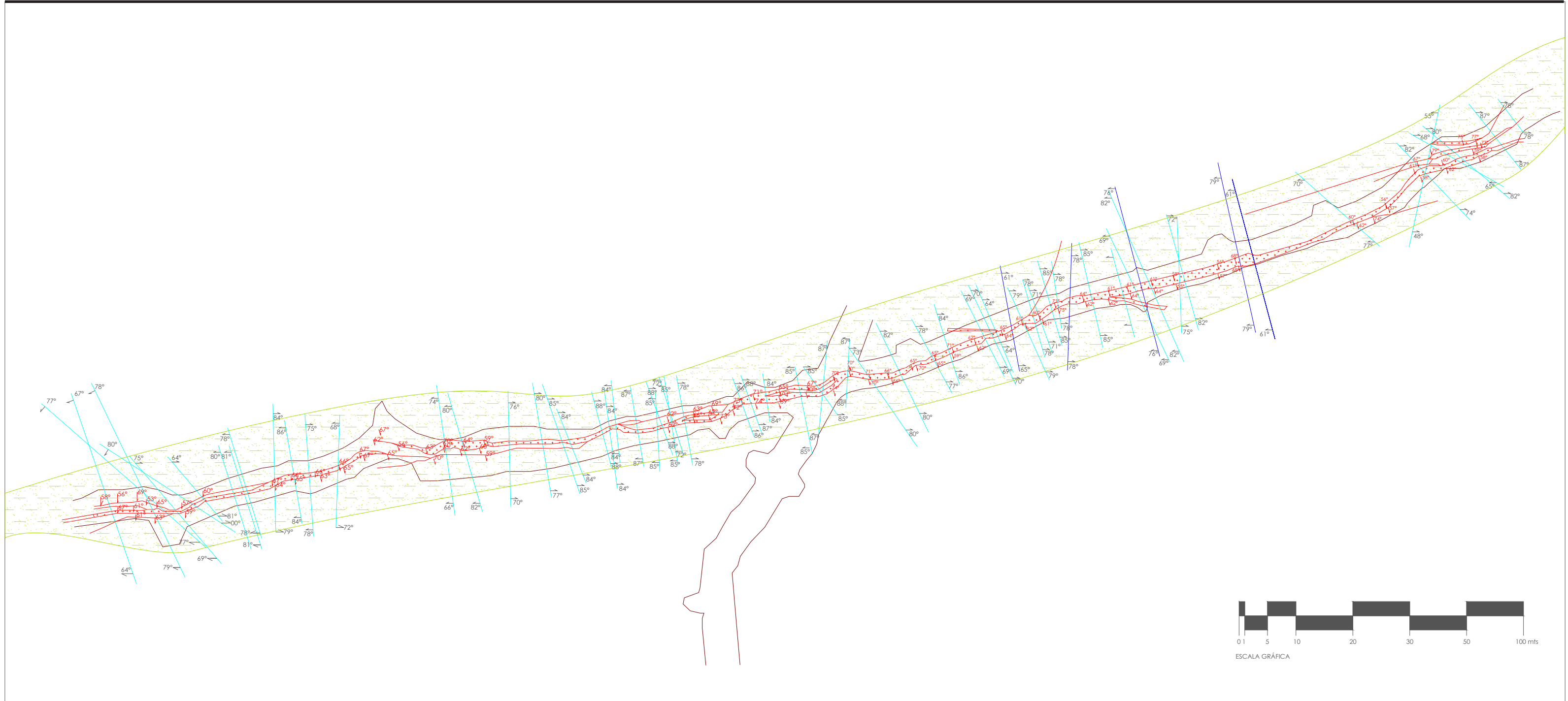
Fecha: 18/11/2018
Dimensiones: 1 x 1 m
Ventana: 3

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
PARÁMETRO		RANGO DE VALORES Y VALORACIONES						VALORACIÓN	
RESIST. COMP. UNIAxIAL (M Pa)		>250 (15)	100-250 (12)	<input checked="" type="checkbox"/> 50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	1	7	
RQD % 69		90-100 (20)	75-90 (17)	<input checked="" type="checkbox"/> 50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	2	13	
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	<input checked="" type="checkbox"/> 0.06-0.2 (8)	< 0.06 (5)	3	8	
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	<input checked="" type="checkbox"/> 1-3 m Long. (4)	3-10mm (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	4A	4	
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	<input checked="" type="checkbox"/> 1- 5 mm (1)	> 5 mm (0)	4B	1	
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	<input checked="" type="checkbox"/> Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C	3	
	RELLENO	Limpia (6)	<input checked="" type="checkbox"/> Duro < 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4D	4	
	ALTERACIÓN	<input checked="" type="checkbox"/> Sana (6)	Lig. Alterada. (5)	Mod.Alterada (3)	Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E	6	
AGUA SUBTERRÁNEA		<input checked="" type="checkbox"/> Seco (15)	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5	15	
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) =								61	
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	II		
DESCRIPCIÓN		I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA	61		

Rumbo perpendicular al eje de la excavacion				Rumbo paralelo al eje de la excavacion		Buzamiento 0°-20° independiente e del rumbo
Direccion con el buzamiento		Direccion contra el buzamiento				
Bz 45°-90° Muy Favorable 0	Bz 20°-45° Favorable -2	Bz 45°-90° Regular -5	Bz 20°-45° Desfavorable -10	Bz 45°-90° Muy Desfavorable -12	Bz 20°-45° Regular -5	

C

PLANO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL



Facultad de Ingeniería, UNAM

**MINERA FRESNILLO,
S.A DE C.V**

FRESNILLO.

Unidad Fresnillo

DEPARTAMENTO :
Geología

LEVANTÓ:
Miriam Álvarez Anguiano
Ing. Julián Castro

ELABORÓ:
Miriam Álvarez Anguiano

CONTENIDO:
Mapa geológico estructural

ESCALA: **1:500**

NIVEL: 3 7 0	ACOTACIONES: EN MTS
VEIA: 6 5 0 0	RAMPA: 3
ÁREA: San Carlos	FECHA: Diciembre 2018

SIMBOLOGÍA	ESTRUCTURAL
— TOPOGRAFÍA NIVEL	— 00° FALLA
LITOLOGÍA	— 00° FRACTURA
■ Klu-ar LUTITA-ARENISCA	
MINERALOGÍA	
■ VETA ECONÓMICA	

Miriam Álvarez Anguiano
Tesis Licenciatura / Facultad de Ingeniería

Bibliografía

- Barthelmy, D. (2007). Mineralogy database. <http://webmineral.com/>.
- Cameron-Clarke, I., & Budavari, S. (1981). Correlation of rock mass classification parameters obtained from borecore and in-situ observations. *Engineering Geology*, 17(1-2), 19–53.
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10–18.
- CONAGUA. (2015). Atlas de agua en México.
- Cuevas-Pérez, E., Serváis, Vortisch, W., & Monod, O. (1985). Una interpretación tectónica de Sinaloa a San Luis Potosí, México. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 37, 2.
- De Cserna, Z. (1976). Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 87(8), 1191–1199.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172–187.
- Dowling, K., & Morrison, G. (1989). Application of quartz textures to the classification of gold deposits using North Queensland examples. *Economic Geology Monograph*, 6, 342–355.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., & Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115–152.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en

- la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343–378.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., & Chávez-Cabello, G. (2018). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56–84.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., Ferrari, L., Et al. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad geológica Mexicana*, 57(3), 227–283.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta botánica mexicana*, (100), 351–403.
- Hubp, J. L. (1990). El relieve de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(1), 82.
- INAFED. (2010). *Estado de Zacatecas*. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM32zacatecas/index.html>
- INEGI. (1981). *Síntesis geográfica de Zacatecas/por CGSNEGI*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220686/702825220686_1.pdf
- Lemus, O., Minjares-Rivera, V., & Wingartz-Carranza, J. (2009). Carta Geológico-Minera Villa de Cos F13-B38, Esc. 1: 50,000.
- Leyva, M., Henández, D., & Manzano, A. J. (2015). *Levantamiento geológico en frentes y cruceros*.
- López, V. (1994). *Manual para la selección de métodos de explotación de minas*. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Maldonado, Y. (2008). *Yacimientos o depósitos epitermales: clasificación y características*. <https://geologiaweb.com/geologia-economica/epitermales/>
- Morán, D. J. (1986). Breve revisión sobre la evolución tectónica de México. *Geofísica Internacional*, 25(1).
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí-Cano, A. (2005). La Mesa

- Central de México: Estratigrafía, estructura y evolución tectónica Cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana*, 57(3), 285–318.
- Ordóñez, E. (1941). Las provincias fisiográficas de México. *Revista Geográfica*, 1(2/3), 133–181.
- Ortíz, E. (2008). Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, (INEGI, México).
- PEMEX. (1988). Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico. *Subdirección de Producción Primaria, Coordinación Ejecutiva de Exploración*, 229.
- Pirajno, F. (2008). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer Science & Business Media.
- Santamaría-Orozco, D., Arenas-Partida, R., & Escamilla-Herrera, A. (1990). Normalización de la nomenclatura estratigráfica en las cuencas mesozoicas de México (Etapa I: Zona Norte. Cretácico). *Instituto Mexicano del Petróleo. Proyecto CAO-3052*.
- Secretaría-de-Economía. (2019). *Minería*. <https://rb.gy/d988wa>
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011). *Engineering rock mass classification: Tunneling, foundations, and landslides*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann.
- Stone, J., & McCarthy, J. (1942). Mineral and metal variations in the veins of Fresnillo, Zacatecas, Mexico. *American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 148, 91–106.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Earth: An introduction to physical geology*. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River.
- Tardy, M., Longoria, J. F., Martínez-Reyes, J., Mitre, L. M., Patiño, M., Padilla y Sánchez, R. J., & Ramírez, C. (1975). Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental: La aloctonía del conjunto cadena alta-altiplano central, entre Torreón, Coah. y San Luis Potosi, SLP. México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*.
- Vallejo, A. (s.f). *Geología Mina Proaño en Fresnillo, Zac. México*.
- Yta, M., Barbanson, L., & Touray, J.-C. (1992). La plata entre los minerales del sector Saucito, Zacatecas, México. Comparación con otros yacimientos de la misma provincia metalogenética Pb-Zn-Ag. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil 1, Allgemeine, Angewandte, Regionale und Historische Geologie*, 1991(6), 1871–1887.