

Geología Mina Proaño en Fresnillo, Zac. México.

RESUMEN

El Distrito minero de Fresnillo se localiza en la parte central de la república mexicana 750 km. al noroeste de la ciudad de México, es un depósito de plata de clase-mundial que incluye vetas epitermales, cuerpos de reemplazamiento, skarns y un stockwork oxidado cerca de la superficie en el Cerro Proaño. El distrito se localiza en la parte norte de un cinturón de tendencia norte-noroeste de depósitos de plata-plomo-zinc que se extienden para más de 800 km. e incluyen los distritos mineros de Sombrerete, Fresnillo, Zacatecas, Real de Ángeles, Guanajuato, Pachuca y Taxco.

Fresnillo es el productor de plata de la mina más grande en el mundo, desde el siglo pasado Fresnillo ha producido aproximadamente 700 millones de onzas de plata y desde 1988 es el mayor productor de plata en México, durante el año 2004 se produjeron 32.8 millones de onzas. El área San Luis es donde todas las nuevas vetas se han descubierto las cuales no afloran, y ésta se localiza hacia el sureste del Cerro Proaño.

Las vetas han sido la fuente principal de mena en Fresnillo. Su ancho varía de unos centímetros a más de diez metros. El zoneamiento vertical favorable para el desarrollo de mineralización de mena en las vetas del área San Luis es aproximadamente de 300 m. a 500 m. y empieza 200 m. debajo de la superficie, y horizontalmente algunas se pueden seguir hasta por cinco kilómetros.

Los minerales de mena en las vetas son un intercrecimiento complejo de sulfuros de metales base de grano fino y sulfosales de plata. Los minerales de

sulfuros y sulfosales identificados en orden de abundancia son pirita, esfalerita, galena pirargirita, polibasita, calcopirita, arsenopirita, tetrahedrita, Argentita/acantita, estefanita, proustita. Los minerales de ganga incluyen cuarzo, calcedonia, calcita clorita y arcillas.

LOCALIZACIÓN

El Distrito Minero de Fresnillo se localiza en la parte central del Estado de Zacatecas, México; aproximadamente a 60 km. Al noroeste de la Ciudad de Zacatecas, sus coordenadas geográficas $23^{\circ}10'29''$ y $102^{\circ}52'39''$ con una elevación sobre el nivel del mar de 2200 m. El Distrito es de fácil acceso por la carretera Panamericana, el Aeropuerto Internacional está localizado a 35 km. al suroeste de Fresnillo. (Fig.-1).

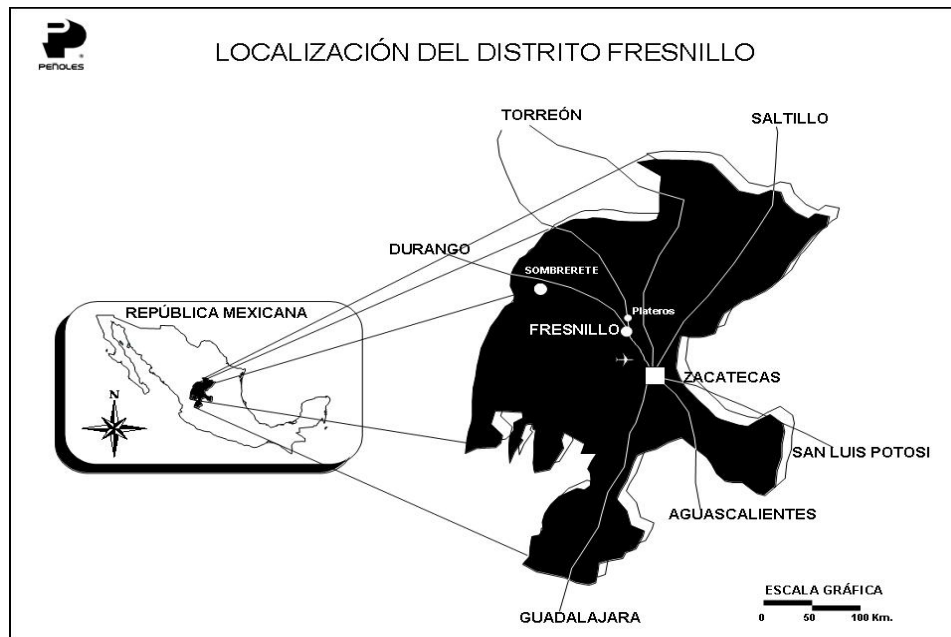


Figura 1.- Mapa mostrando la localización del Distrito Minero de Fresnillo.

HISTORIA.- El Estado de Zacatecas ha sido famoso por sus minas desde el tiempo de los españoles; en 1554 Diego Fernández de Proaño descubrió algunas de las vetas que afloraban en el Cerro y que hoy lleva su nombre "Cerro Proaño". El Mineral de Fresnillo fue explotado normalmente desde 1717 a 1751 por mineros en pequeña escala, las operaciones fueron suspendidas en

1757 debido principalmente a problemas económicos causados por el agua en la mina. De 1835 a 1872 se adquirieron dos bombas Cornish impulsadas por vapor para desaguar las Minas. En 1912 empezó a operar una planta de cianuro con 400 toneladas por día para el mineral de los óxidos. De 1913 a 1919 las operaciones se suspendieron debido a la Revolución mexicana. El tratamiento de mineral de sulfuros empieza en 1926 y continúa hasta hoy. La producción de la Mina Proaño ha ido en aumento desde la década de los 80's y en el 2004 se produjeron 1'625,000 toneladas de mineral y se espera que para el año 2005 se alcancen 2'200,000 toneladas métricas de mineral para ser la mina productora de plata más importante a nivel mundial.

PRODUCCIÓN.- En el Distrito se tienen datos de producción desde 1921 y hasta el presente la mina ha producido más de 700 millones de onzas de plata como se ve en la tabla 1.


 PRODUCCION 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

ESTRATIGRAFÍA.- En el área de Fresnillo se presenta una secuencia estratigráfica correspondiente a un dominio volcano-sedimentario de edad Jurásico Superior al Cretácico asociado a un arco y que regionalmente se conoce como terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983). Caracterizado por la presencia de una asociación litológica de grauvacas, lutitas, calizas, conglomerados y material volcánico andesítico como son lavas andesíticas (almohadilladas) intercaladas con depósitos terrígenos y en forma subordinada con rocas calcáreas. (Fig.-2).

Formación Chilitos.- Las rocas verdes que afloran en el arroyo Chilitos son una secuencia de lavas andesíticas de color gris oscuro con tonalidades rojizas y verduscas, con formación de almohadillas, brechas de color verde rojizo y rocas volcánicas epiclásticas. La descripción de la secuencia son basaltos almohadillados de color verdoso y aglomerados andesíticos, intercalados con limolitas de color café olivo, grauvacas y lutitas. Los basaltos porfiríticos son generalmente de color verde a café rojizo, conteniendo cristales de plagioclasa. La matriz consiste de clorita, celadonita y ferromagnesianos. El color verde de los basaltos se piensa que está relacionado a una actividad hidrotermal submarina, posterior a su depositación en el piso marino. La edad para esta Formación Chilitos es de edad Jurásico Superior hasta el Albiano. La deformación prelaramídica encimó tectónicamente a la secuencia volcano-sedimentaria sobre si misma y esto se refleja localmente en Fresnillo, en el ensamble que hoy se conoce como Grupo Proaño y Formación Chilitos.

El Grupo Proaño fue definido por Stone y McCarthy (1942), dividiéndolo en tres miembros; Grauvaca Inferior, Lutitas Calcáreas y Carbonosas y Grauvaca Superior correspondiendo a una edad del Cretácico Inferior.

Grauvaca Inferior.- Corresponde al miembro inferior del Grupo Proaño y consiste de una secuencia de grauvacas de grano medio color gris oscuro, con intercalaciones de lutitas calcáreas en estratos delgados y lentes de caliza.

Este miembro no aflora, solo se puede ver en las obras mineras subterráneas del Distrito.

Lutitas Calcáreas y Carbonosas.- Corresponde al miembro medio del Grupo Proaño y se compone de una alternancia de lutitas calcáreo-carbonosas y calizas arcillosas estas son generalmente impuras lo que nos indica que el depósito ocurrió en un ambiente dominado por la depositación de terrígenos observándose todo este paquete muy tectonizado, estas rocas corresponden a una edad del Albiano superior.

Grauvaca Superior.- Corresponde al miembro superior del Grupo Proaño y consiste de areniscas masivas y una secuencia de areniscas y lutitas de estratificación fina. En algunos horizontes existe una alternancia de lutitas carbonosas, lutita, calizas y areniscas de estratificación fina, la edad de estas rocas se determinó en base a un estudio paleontológico asignándosele una edad de Cretácico Temprano.

Formación Fresnillo.- Se define como un depósito masivo de material conglomerático en el que un 30-40 % de la roca la constituyen clastos de lutita, arenisca y pedernal, con tamaños que varían desde unos cuantos milímetros hasta 10 cm. Su base se puede observar en el área de la veta Santo Niño, los clastos son angulosos y subredondeados y es clasificado como una brecha sedimentaria en una matriz arenosa bien consolidada quedando su edad definida como del Paleoceno-Eoceno.

Rocas Volcánicas.- La secuencia volcánica de Fresnillo que se encuentra sobreyaciendo tanto a los sedimentos marinos como al conglomerado Terciario, esta constituida por Riolitas y Tobas Rioliticas, se le determinó una edad que varia de 38.3 Ma. a 27.4 Ma. (Lang et al., 1988).

Rocas Intrusivas.- Las rocas intrusivas que afloran en el área de Fresnillo ocurren como intrusiones pequeñas y su clasificación es cuarzomonzonita, con

fenocristales de cuarzo y plagioclasa sódica, tiene una matriz afanítica de color gris a gris verdoso, formada de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico. El apófisis mayor se encuentra en el área del tiro Fortuna. El rango de edad varia de los 33.5 Ma. a los 32.2 Ma. y por lo tanto correspondientes al Oligoceno tardío. (Lang, et al., 1988).

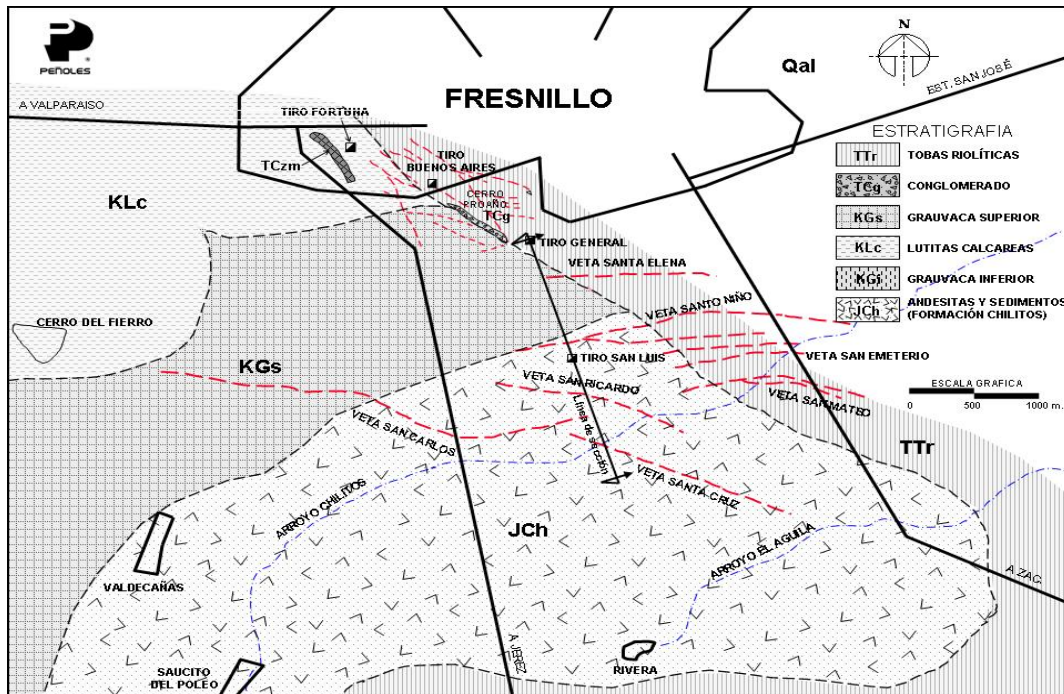


Figura 2.- Mapa mostrando la estratigrafía y las principales vetas en el Distrito Fresnillo.

En el Distrito Minero de Fresnillo se tiene definidos dos sistemas estructurales de fracturas y fallas donde se emplazan los depósitos de vetas económicas:

- 1.- Sistema de vetas del Cerro Proaño con una dirección de vetas predominantemente NW-SE.
- 2.- Sistema de vetas Área San Luís con dirección predominante Este-Oeste, este sistema de vetas son ciegas y solamente se encuentran por debajo de 200 m. desde superficie.

Estos dos sistemas estructurales son tan suficientemente parecidos en texturas, composición química e isótopos que nos indican que las vetas son

parte de un gran sistema formado al mismo tiempo y dentro del mismo esfuerzo de régimen regional.

Yacimientos Minerales: El yacimiento mineral del distrito Fresnillo se clasifica como del tipo epitermal en el que las vetas del área San Luís exhiben un estilo similar de desarrollo de vetas formadas en cuatro etapas de actividad hidrotermal.

Los cuerpos minerales económicos que se han explotado en el Distrito son: Stockwork, Diseminados, Mantos, Chimeneas y Vetas.

Las vetas son los cuerpos minerales más importantes del distrito; éstas fueron las que dieron origen al descubrimiento del mismo y son actualmente las que representan la mayor importancia económica en el distrito.

Mineralogía.- Los minerales de cada una de las vetas en el Área San Luís exhiben una composición similar y estilo de desarrollo en vetas. Simmons y Gemell (1988), describieron en detalle la mineralogía de Santo Niño que consiste en un complejo intercrecimiento de sulfuros y sulfosales de grano fino a medio en ganga de cuarzo y calcita. Sulfuros hipogénicos y minerales de sulfosales identificados en la veta, en orden de abundancia son: pirita, esfalerita, galena, pirargirita, polibasita, calcopirita, arsenopirita, tetrahedrita, proustita, antimonpearcita, pirrotita, y polibasita de selenio. Marcasita argentita/acantita, estefanita y plata nativa han sido identificadas ambas como fases hipogénica y supergénica. En los niveles superiores las fracturas contienen limonita, hematina, óxidos de manganeso, malaquita, azurita y plata nativa. Los minerales de ganga incluyen cuarzo, calcedonia, calcita, clorita y arcillas.

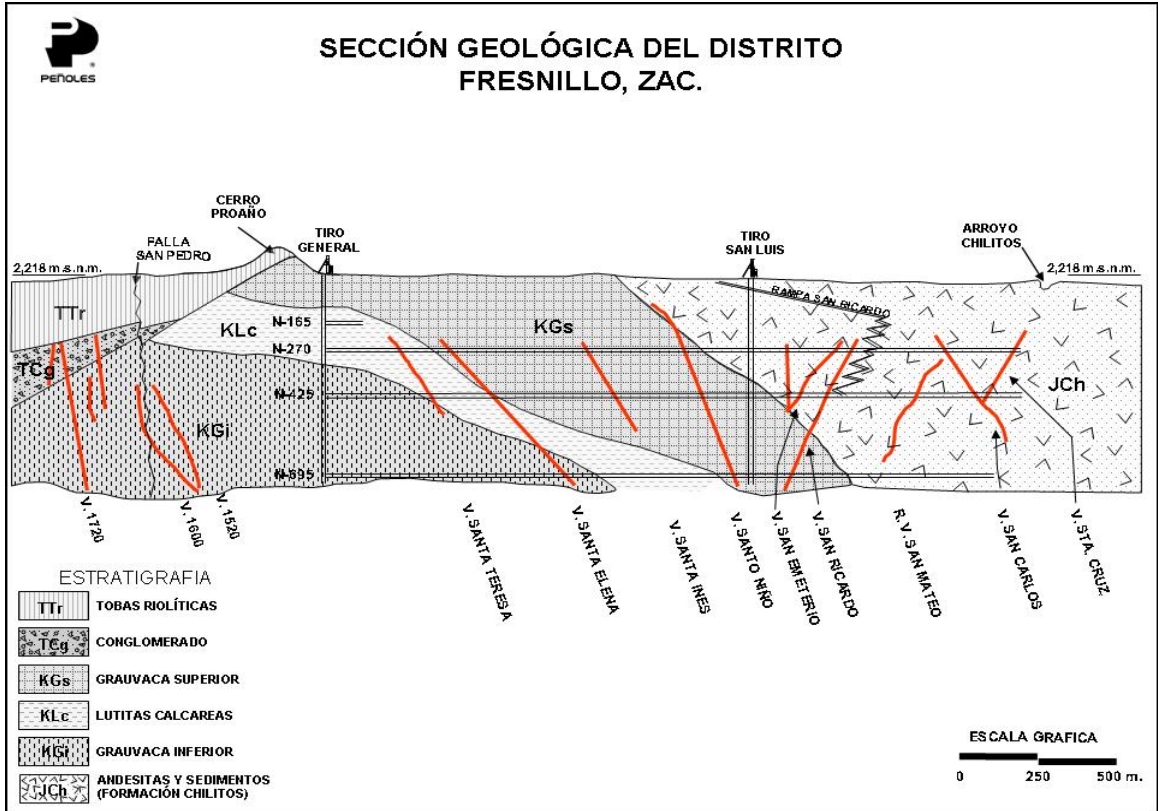


Figura 3.- Sección mostrando la localización de las principales vetas en el Distrito Fresnillo.

Descripción de las principales Vetas.

Veta Santo Niño.- Es una de las más importantes por su longitud y tonelaje extraído y ley promedio de Ag en todo el Distrito. Tiene un rumbo general N 75° E, con variaciones locales de $\pm 20^\circ$ y una inclinación de 60° a 85° al S, el ancho de la veta varía desde 0.1 m a más de 6.0 m, teniendo en promedio 2.81 m y longitud de 2,500 m. Su descubrimiento se remonta al año de 1975 y se descubrió con barrenación de diamante desde superficie y posteriormente se fue intersectando con desarrollo de obra minera en los subsecuentes años. Los niveles que se han desarrollado son: del 215 al 695. Los minerales de mena son sulfuros y sulfosales que fueron depositados en una secuencia paragenética similar a lo largo de cuatro etapas mineralizantes y ocupan en

promedio menos del 10% del relleno total. Los principales minerales de mena son: pirargirita, polibasita, tetrahedrita, proustita, esfalerita, galena y argentita.

Veta San Ricardo.- La veta San Ricardo es una estructura que se encuentra alojada en una brecha de falla de rumbo N 75° W, con buzamiento de 75° al NE, con longitud de 1200 m. y un ancho promedio de 2.86 m. Fue intersectada mediante el desarrollo del Xc-108-SE del Nivel 425, cuyo objetivo principal era el de llegar a la proyección de la veta Santa Cruz. La mineralogía consiste más en sulfuros de plomo y zinc con algo de sulfosales de plata.

Veta Santa Cruz.- Es la estructura desarrollada más al sur de la mina, con rumbo promedio de N 78° W, echado de $\pm 65^\circ$ al NE, tiene una longitud de 1500 m. aproximadamente y ancho promedio de 4.7 m. conocida con obra directa y barrenación a diamante. Está constituida mineralógicamente por cuarzo blanco, amatista y calcita de texturas coloforme con zonas de brechamiento y minerales de sulfuros y sulfosales de plata.

Veta San Carlos.- En el año de 1997 al avanzar en el cuele de la obra en la veta San Miguel en el nivel 270 y con el antecedente de el barreno SD-757 se inició la exploración en superficie de esta zona hacia el bajo para proyectar la estructura de la veta San Carlos y al intersectarse el área mineralizada se inició el desarrollo de los niveles 270 y 425. Es la estructura desarrollada más al surponiente de la mina, con rumbo promedio Este-Oeste en su parte oriente y con flexión de rumbo NW hacia el lado poniente, echado de $\pm 65^\circ$ al SE y ancho promedio de 3.10 m, presenta una textura bandeada en general con algunas zonas de brecha tanto al bajo como al alto de la estructura y está constituida mineralógicamente por sulfuros y sulfosales de plata como galena, esfalerita, argentita, polibasita y pirargirita. La exploración a la fecha en esta Veta con desarrollo de obra de varios niveles y subniveles y barrenos a diamante ya alcanza los 5550 m.

Veta San Mateo.- Esta veta se localiza 600.0 m al alto del extremo oriente de la veta Santo Niño, la estructura presenta un rumbo general de S80°E, echado de $\pm 75^\circ$ al Sur y ancho promedio de 1.76 m. su longitud conocida son

aproximadamente 1000 m. con obra y barrenos de diamante. Esta estructura consiste de cuarzo y calcita de forma irregular con alteración clorítica y contenidos metálicos de oro importantes además de sulfuros de plomo, zinc y plata. Se ha desarrollado desde el nivel 270 al 530. (Fig.-3).

PARAGENESIS Y ZONEAMIENTO:

La depositación mineral es dividida en cuatro fases paragenéticas: 1) pirita y arsenopirita, 2) esfalerita, galena, calcopirita, con una segunda generación de pirita y arsenopirita, 3) sulfuros y sulfosales de plata, y 4) sulfuros supergénicos y óxidos. La evolución paragenética de los minerales de sulfuros y sulfosales de plata es desde cobre-plata hasta plata nativa: a) tetrahedrita, polibasita y pirargirita, b) polibasita, pirargirita y estefanita, c) pirargirita y acantita, y d) acantita. La tetrahedrita fue la primer sulfosal en precipitar, inicialmente con calcopirita y subsecuentemente con pirargirita y polibasita. Pirargirita y polibasita reemplazaron generaciones tempranas de sulfuros y tetrahedrita, comúnmente rellenando fracturas delgadas y cavidades en otros minerales. Trazas de estefanita están asociadas con polibasita como un reemplazamiento pseudomórfico. Cantidades menores de acantita son principalmente intercrecimientos con una etapa tardía de pirargirita. El zoneamiento mineral es el siguiente: pirita, hematina y acantita son más abundantes en las partes superiores de las vetas, esfalerita, pirargirita, polibasita y plata nativa son más abundantes en los niveles intermedios, pirrotita como inclusiones en esfalerita, galena, calcopirita, y arsenopirita se encuentran concentrados en los niveles inferiores. (Fig.-4).

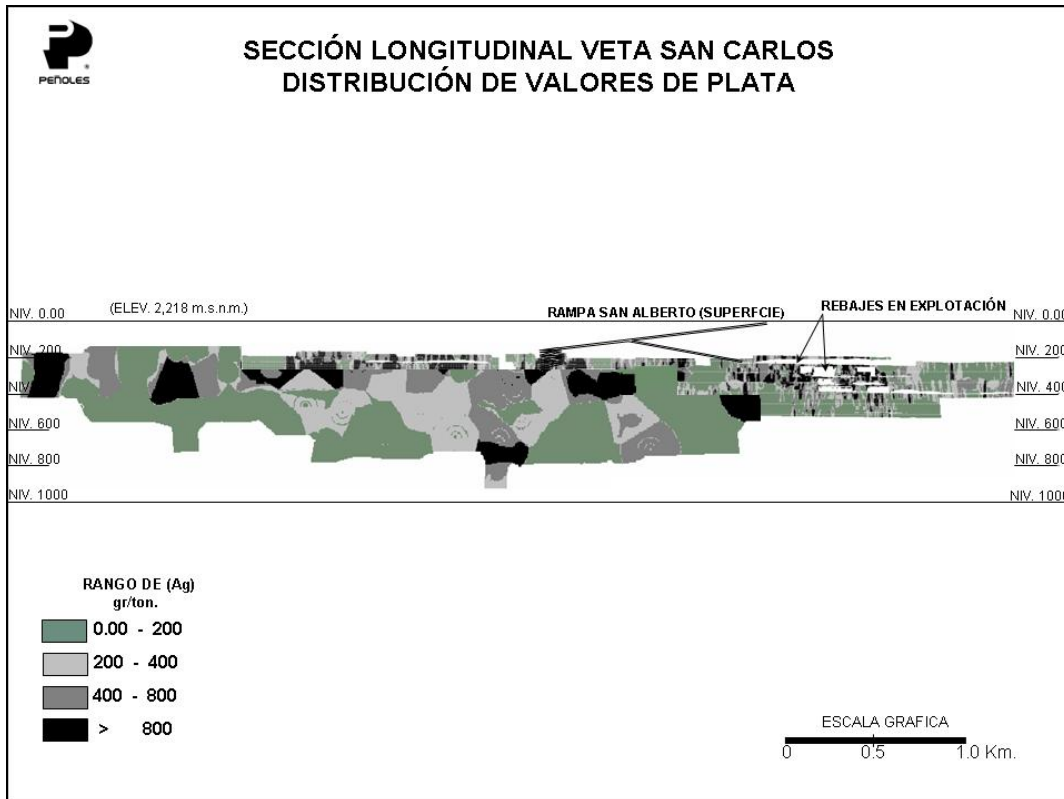


Figura 4.- Sección longitudinal mostrando la distribución de los valores de plata en la veta San Carlos del Distrito Fresnillo.

DEPÓSITO DE MINERALES:

El desarrollo de la mineralización fue originado por episodios múltiples de actividad hidrotermal. Dentro de cada etapa de la veta, el volumen de los minerales de la mena se deposita primero como cocada o bandas crustiformes y brecha, seguido por una depositación menor como diseminaciones ó vetillas en la ganga de cuarzo y calcita. De los estudios de texturas de la mena dentro de la veta Santo Niño, se han identificado cuatro fases fluidas que observan toda la evidencia de ebullición.

Etapa 1. - Es volumétricamente la etapa más importante. Esta etapa ocurre virtualmente a través de toda la veta, tiene un brechamiento a lo largo del

contacto del alto con una matriz de fragmentos de brecha con un bandeamiento bien desarrollado y matriz de cuarzo de color blanco-gris.

Etapa 2.- Brecha soportada con fragmentos altamente alterados, un pobre bandeamiento y una matriz de cuarzo cloritizada. En varios lugares, la etapa 1 está ausente y la etapa 2 representa el evento mineralizante más temprano.

Etapa 3.- Ocurre a través de toda la veta y corta transversalmente las etapas tempranas de mineralización con contactos definidos y está comprendida por bandas crustiformes de cuarzo y sulfuros.

Etapa 4.- Representa la etapa final de mineralización y es la más desarrollada en la parte central de la veta. Esta etapa está caracterizada por calcita masiva con pequeñas cantidades de cuarzo fino y algunas ocurrencias de sulfosales de plata.

Se han reconocido dos tipos de fluidos durante las fases de la mineralización: primero la de temperatura más alta (270°-355°C), salinidad (10-17 wt% NaCl) fluidos magmáticos resultando mineralización de metales base. Estos fluidos produjeron vapor en soluciones de sulfatos ácidos condensándose por encima del nivel freático resultando una fuerte alteración de alunita y kaolinita y que puede ser indicativo de cuerpos minerales ciegos. Después la temperatura más baja (190°-250°C), cerca del pH neutro, la salinidad baja (<5 wt% NaCl), fluidos probablemente meteóricos que produjeron cuarzo extendido, calcita, illita, y alteración de clorita que se observan en la superficie.

Dos fases de la actividad hidrotermal son consideradas que pueden haber ocurrido, separado por un cambio importante en la profundidad del nivel freático. Cuando el nivel freático era más somero una fase fluida hidrotérmal temprana produjo los líquidos magmáticos responsables de la mineralización rica en metales básicos (mineral de sulfuros pesados) y de pH neutral, fluidos meteóricos formaron clorita, calcita, cuarzo, adularia. La segunda fase era un fluido meteórico más tardío, en el cual el flujo regional era aumentado debido a

la deformación adicional y fue entremezclada con las salmueras magmáticas ocasionales que dieron lugar a los depósitos ricos de plata.

EDAD DE ACTIVIDAD HIDROTHERMAL

Las medidas de K-Ar demuestran un patrón evolutivo de volcanismo félsico inicial (38.4 ± 8 Ma.) seguidos por una intrusión ígnea (32-33 Ma.), actividad hidrotermal (29-31 Ma.) y finalmente volcanismo félsico postmineral (27-28 Ma.) Estos datos están de acuerdo con la secuencia de eventos que pueden ser deducidos de las relaciones geológicas locales.

Recursos Minerales: El total de recursos económicos como son: reservas probadas, reservas probables y mineral indicado se mencionan a continuación. (Tabla-2).

PEÑÓLES	RECURSOS MINERALES MINA PROAÑO UNIDAD FRESNILLO				
	toneladas métricas	E N S A Y E S			
		gr/t Au	gr/t Ag	% Pb	% Zn
RESERVAS PROBADAS	9,984,635	0.60	530	0.51	0.89
RESERVAS PROBABLES	4,287,174	0.64	547	0.49	0.84
TOTAL RESERVAS	14,271,809	0.61	535	0.50	0.88
MINERAL INDICADO	16,613,699	0.68	590	1.32	2.10
TOTAL RECURSOS MINERALES	30,885,508	0.65	565	0.94	1.54

TABLA-2

CONCLUSIONES:

La Mina de Fresnillo es actualmente es el productor de plata de la mina más grande en el mundo, desde el siglo pasado Fresnillo ha producido aproximadamente 700 millones de onzas de plata y desde 1988 es el mayor productor de plata en México, durante el año 2004 se produjeron 32.8 millones de onzas.

La geología del Distrito Minero de Fresnillo ha sido estudiada por diversos autores, la estratigrafía del área está representada por una secuencia gruesa de rocas sedimentarias marinas del Jurásico superior al Cretácico inferior y de

volcánicos submarinos, que infrayacen discordantemente rocas volcánicas félsicas del Terciario medio y basaltos aislados de fines del Terciario. En la mayor parte de la región la roca está cubierta por aluvión, encontrándose pequeños subafloramientos localmente en arroyos y colinas bajas.

Existen dos sistemas estructurales y son tan suficientemente parecidos en texturas, composición química e isótopos que nos indican que las vetas del sistema NW y las del sistema E-W son parte de un gran sistema formado al mismo tiempo y dentro del mismo esfuerzo de régimen regional.

La mineralización consiste de cantidades variables de ganga, sulfuros y sulfosales, depositados en espacios vacíos que fueron formados durante múltiples eventos de abertura. La mineralización ocurre en vetas bandeadas simétricamente o más comúnmente, dentro de los intersticios de las brechas en la veta. En cualquier localización, un estudio de la veta revela hasta cuatro etapas distinguibles de brechamiento y mineralización. La mineralogía principal de las vetas son sulfosales de plata y sulfuros de plomo-zinc con cantidades menores de oro.

La veta más importante en la actualidad es la veta San Carlos que contiene aproximadamente 17'800,000 toneladas de mineral económicamente costeable cuyo contenido metálico más importante es la plata. Los recursos minerales totales para la mina son 30'885,508 toneladas con ley de plata promedio de 565 gr/t.

REFERENCIAS:

- Campa-Uranga, M. F., y Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, p. 1040-1051
- Chico, E., 1986 Mineralogy, paragenesis and fluid inclusion studies in three veins of the Fresnillo mining district; Zacatecas, Mexico; unpub. M.S. Thesis, Dartmouth College, 115 p.
- De Cserna, Z., Delevaux, M.H., Harris, D.C., 1977, Datos isotópicos, mineralógicos y modelo genético propuesto para los yacimientos de plomo, zinc y plata de Fresnillo, Zacatecas: , México,

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v1, no. 1, p110-116.

- De Cserna, Z. (1976). Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, México. GSA Bulletin, v. 87, p. 1191-1199.
- García M. Enrique, Querol S. Francisco y Lowther G. K., 1985, Geología del distrito minero de Fresnillo, Zacatecas. Síntesis geológica de las principales unidades mineras del Grupo Fresnillo. Departamento de investigaciones geológicas, preparado para el volumen conmemorativo de la Geological Society of America, 38 p. (inédito).
- Gemmell, J. B., Simmons, S. F., y Zantop, H., 1988, The Santo Niño Silver-Lead-Zinc Vein, Fresnillo District, Zacatecas, México: Part. I. Structure, vein stratigraphy, and mineralogy: Economic Geology, v. 83, p. 1597-1618.
- Lang, B., Steinitz, G. , Sawkins, F. J., and Simmons, S. F., 1988, K-Ar Age studies in the Fresnillo Silver District, Zacatecas, Mexico: Economic Geology, v. 83, p. 1642-1646.
- Lang, J. R., (1995). A geological report on the San Ricardo and Santa Cruz veins, and the deeper levels of the Santo Niño vein. 25 p. unpublished.
- Ruvalcaba Ruiz D. C., Thompson, T. B. (1988). Ore Deposits at the Fresnillo Mine, Zacatecas, México. Economic Geology, v. 83 p. 1583-1596.
- Simmons, S. F., Gemmell, J. B., Sawkins, F. J. (1988). The Santo Niño silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas, México; Part II. Physical and chemical nature of ore-forming solutions. Economic Geology, v. 83, p. 1619-1641.