



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

PARÁMETROS MAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA
EXPLORACIÓN DE MENAS DE HIERRO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERA GEÓLOGA

P R E S E N T A

DANAEL ACEVES PADILLA



MÉXICO, D.F.

AGOSTO, 2010

Al cosmos en general y en particular:

En mi corazón, A mi mami: por tu apoyo incondicional, tus bellas palabras, tu linda sonrisa y tu forma de amar la vida, eres la más dulce y sincera compañía que he tenido desde que aparecí en éste planeta. Te amo para siempre.
A Emi: Por el amor, apoyo, paciencia y los bellísimos momentos. Me flechaste te amo.

En mi casa, A Chesca y Manzana por enseñarme lo sencillo que es amar y lo divertido que es la vida cuando se comparte, gracias por las babas, los ladridos y los pelos.

En la escuela, A todos los amigos que siempre me regalaron una sonrisa: Amalia Montoya, Diego Contla, Manolo Arrubarrena , Oscar Castro, Oscar Santiesteban, Paquito Trinidad, Pepe Estrada, Rebeca Espinosa, Rodrigo Gutierrez, Victor Lojero.

Por aquí y por allá, Por muchas risas y mucho cariño a: Silvia Mattera, Esther Castro, Cecilia Gandarilla, Jimena García, Tania Rodriguez y Rodrigo Checa.

Agradecimientos

A mi tutor Dr. Francisco Martín Romero

Al Ing. Germán Arriaga por compartir sus conocimientos

A la Maestra Guadalupe Villaseñor por su disposición, interés, apoyo y consejos

Al Ing. Alfredo Victoria Morales, por su apoyo a lo largo de la carrera y por el cariño que nos regala a los estudiantes.

Al Dr. Carlos Garza por su apoyo.

Por dejarme aprender de ellos, agradezco a los Ingenieros, Maestros y Doctores :

Angélica Molina, Antonio Hernández, Arturo Tapia, Baldomero Carrasco, Berlaine Ortega, Claudia Mendoza, Daniel Bolaños, Dante Morán, Elena Centeno, Fernando Rosique, Gabriel Salinas, Gilberto Silva, Héctor Macías, Javier Arellano, Luis Espinoza, Olivia Zamora, Ricardo Padilla, Víctor Castañón.

CONTENIDO

Resumen	6
ABSTRACT	8
Introducción	10
I. ANTECEDENTES	12
1.1 Aspectos relevantes del Hierro	12
1.2 Importancia Económica del Hierro en México	14
1.3 Historia de la exploración y explotación de Peña Colorada	16
II. ASPECTOS FÍSICOS, GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO-MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO	18
2.1 Localización	18
2.2 Clima	18
2.3 Aguas Superficiales	19
2.4 Fisiografía	20
2.5 Geología Regional	21
2.6 Evolución geológica	23
2.7 Geología Local del área de estudio: Zona Peña Colorada Zona Sureste	24
2.7.1 Estratigrafía de Peña Colorada	25
2.7.2 Geología Estructural de la zona Peña Colorada	28
2.7.3 Estratigrafía de la Zona Sureste	31
2.7.4 Geología estructural de la Zona Sureste	34
III. METODOLOGÍA DE TRABAJO	37
3.1 Trabajo de campo	37
3.2 Laboratorio	38
3.3 Susceptibilidad magnética	39
3.3.1 Concentración total de metales	41
3.3.2 Composición mineralógica	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 Peña Colorada	44
4.1.1 Muestras de Mano	44
4.1.2 Muestras anómalas respecto al hierro	48
4.2 Zona Sureste	58
4.2.1 Muestras de mano	58
4.2.2 Muestras anómalas respecto al hierro	61
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
APÉNDICE	73
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

Índice de Tablas

Figura 1.1 Volumen y valor de la producción de Hierro en Colima del 2003 al 2007. Tomado de SGM (2008)	15
Figura 2.1 Localización del área de estudio	19
Figura 2.2 Provincias Fisiográficas de México. (Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEG. 1991)	20
Figura 2.3. Fotografía del tajo en Peña Colorada (Andesitas/Masivo)	26
Figura 2.4 Mapa Geológico de Peña Colorada (Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)	30
Figura 2.5. Mapa Geológico de la Zona Sureste (Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)	36
Figura 3.1. Puntos de muestreo	37
Figura 3.2. susceptibilímetro MS2 y los sensores MS2D y MS2B Utilizados en este estudio	39
Figura 3.3. Equipo Fluorescencia de Rayos X, portátil (NITTON XLt3)	41
Figura 3.4 Límites de detección del Equipo Fluorescencia de Rayos X, portátil (NITTON XLt3)	43
Figura 4.1 Correlación entre valores de susceptibilidad magnética (SM) y concentración total de (Fe%), en el área de la mina Peña Colorada.	44
Figura 4.2 Comparación de valores de concentración de Fe% en ambas áreas Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)	45
Figura 4.3 Comparación de valores de susceptibilidad magnética en ambas áreas Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)	45
Figura 4.4 Mapa de Concentración de hierro en las muestras de mano en Peña Colorada	46
Figura 4.5 Mapa de Susceptibilidad magnética en muestras de mano en Peña Colorada	47
Figura 4.6 Mapa de Concentración de Hierro en muestras anómalas respecto al hierro en Peña Colorada	49
Figura 4.7 Mapa de Susceptibilidad Magnética en muestras anómalas respecto al hierro en Peña Colorada	51
Figura 4.8 Concentración de Bario en Peña Colorada	
4.9 Concentración de Calcio en Peña Colorada	51
Figura 4.10 Concentración de Cobre en Peña Colorada	
Figura 4.11 Concentración Estroncio e en Peña Colorada	52
Figura 4.12 Concentración de Manganeso en Peña Colorada	
Figura 4.13 Concentración de Potasio en Peña Colorada	53
Figura 4.14 Concentración de Titanio en Peña Colorada	
Figura 4.15 Concentración de Zinc en Peña Colorada	54
Figura 4.16 Concentración de Zirconio en Peña Colorada	55
Figura 4.17 Tabla de Difracción de Rayos x	56
Figura 4.18 Tabla completa de muestras con valores superiores respecto al hierro (anómalas) en Peña Colorada	57
Figura 4.19 Correlación entre susceptibilidad magnética (SM) y concentración total de (Fe%), en el área de la mina Peña Colorada	58
Figura 4.20 Mapa de Concentración de Hierro en la Zona Sureste	59
Figura 4.21 Mapa de Susceptibilidad Magnética en el área sureste	60
Figura 4.22 Concentración de hierro en muestras anómalas respecto al hierro en la zona sureste	62
Figura 4.23 Susceptibilidad Magnética en muestras anómalas respecto al hierro en la zona sureste	63
Figura 4.24 Concentración de Bario en la zona sureste	
Figura 4.25 Concentración Calcio en la zona sureste	64

Figura 4.26 Concentración de cobre en la zona sureste	
Figura 4.27 Concentración estroncio en la zona sureste	65
Figura 4.28 Concentración de Manganeso en zona sureste	
Figura 4.29 Concentración de Potasio en zona sureste	66
Figura 4.30 Concentración de Titanio en zona sureste	
Figura 4.31 Concentración de Zinc en zona sureste	67
Figura 4.32 Concentración de Zirconio en zona sureste	68
Figura 4.33 Tabla de Difracción de Rayos x	69
Figura 4.34 Tabla completa de muestras con valores superiores respecto al hierro (anómalas) en la Zona Sureste.	70

Resumen

Dada la importancia estratégica que tiene el hierro para la economía de México y el mundo, es necesario proponer “guías de exploración indirectas” que sean rápidas y de fácil aplicación y que junto a las guías convencionales de exploración (controles litológicos y estructurales) podrían dirigir la exploración directa (perforación) con el fin de incrementar las reservas en las minas actualmente explotadas o identificar nuevos prospectos, donde los estudios regionales geológicos y geofísicos han señalado sitios con potencial para la exploración local de menas de hierro.

El presente trabajo seleccionó la mina Peña Colorada para definir tales “guías de exploración indirecta”, debido a que la mina cuenta con uno de los yacimientos de hierro más importantes de México, cuya producción cubre necesidades nacionales que aumentan año con año debido al crecimiento urbano y tecnológico.

Por ello propone la relación entre los controles litológicos y estructurales utilizando la susceptibilidad magnética y la concentración de los metales de interés como “guías indirectas de exploración”.

Se muestrearon un total de 186 ejemplares en ambas zonas las muestras fueron descritas en campo y llevadas al Laboratorio de Geoquímica en el Instituto de Ingeniería para obtener de ellas la Susceptibilidad Magnética, Fluorescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X.

La susceptibilidad magnética fue medida con el Sistema MS2 de Bartington Instruments Ltd realizando tres medidas a cada muestra para obtener de ellas un promedio, el instrumento es muy sencillo de operar, portable confiable, rápido y de bajo costo.

La Fluorescencia de Rayos X fue medida con el dispositivo “NITON XL3t” con el cual se realizaron de 4 a 5 medidas a cada muestra para obtener de ellas un promedio, el instrumento y el software es sencillo de operar, portable, confiable y rápido.

La difracción de rayos x se obtuvo con un Difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con filtro de Ni, tubo de cobre y monocromador, para analizar las muestras fue necesario molturarlas y homogenizarlas.

Los resultados de la Susceptibilidad Magnética, Fluorescencia de Rayos X y la Difracción de Rayos X, permitieron identificar a los patrones estructurales de

orientaciones preferenciales NW-SE y NE-SW como estructuras relacionadas a la mineralización de la zona.

Utilizando el criterio estructural, litológico y los resultados analíticos se identifica la porción sur de la Zona Sureste como un nuevo prospecto con el fin de incrementar las reservas en la mina.

ABSTRACT

Given the strategic importance of iron to the economy of Mexico and the world, it is necessary to propose "indirect exploration guides" that are quick and easy application and along with conventional guidelines for testing (lithological and structural controls) could lead direct exploration (drilling) in order to increase reserves in the mines currently operated or identify new prospects, where the regional geological and geophysical studies have identified potential sites for local exploration of iron ore.

This study selected the Peña Colorada mine to define such "indirect exploration guides, because the mine has one of the most important iron ore deposits of Mexico whose production covers domestic needs that increase each year due to urban growth and technology.

It therefore proposes that the relationship between the lithologic and structural controls using the magnetic susceptibility and concentration of the metals of interest as "indirect exploration guides."

We sampled a total of 186 individuals in both areas the samples were described in the field and taken to the Geochemistry Laboratory at the Institute of Engineering of them for Magnetic Susceptibility, X-ray fluorescence and X-ray diffraction

The magnetic susceptibility was measured with the Bartington MS2 System Instruments Ltd by three measures to each sample to obtain from them an average, the instrument is very simple to operate, portable and low cost.

The X-ray fluorescence was measured with the device "Niton XL3t" with which were made of 4-5 measures each sample to obtain from them an average, the instrument and the software is simple to operate and is portable.

X-ray diffraction was obtained with a Shimadzu XRD-6000 diffractometer equipped with Ni filter, copper tube and monochromator to analyze the samples was necessary moltularlas and homogenized.

The results of magnetic susceptibility, X-ray fluorescence and X-ray diffraction, used to identify the structural patterns of preferential directions NW-SE and NE-SW and structures related to the mineralization of the area.

Using structural criteria, lithology and analytical results identified the southern portion of the Southeast as a new leaflet to increase reserves at the mine.

Introducción

El hierro ha sido un metal muy importante para el desarrollo de muchas civilizaciones, actualmente además de ser materia prima para la fabricación de acero, se emplea en pigmentos, cemento, refractarios básicos, en la fundición de los metales no ferrosos y como un constituyente en algunos agentes catalíticos.

Dicha importancia se demuestra por su creciente producción mundial en los últimos años:

Para los 70´s oscilaba entre 150 y 240 millones de toneladas anuales. Estados Unidos fue el productor del 50% del hierro seguido por Francia con 11% y Rusia con 10% (Bateman, 1982)

Para el 2006, se produjeron 1,690 millones de toneladas de hierro en el mundo, el principal productor fue China con alrededor del 30.8% del total (520 millones de toneladas) seguido por Brasil (300 millones), Australia (270 millones), India y Rusia con 150 y 105 millones respectivamente y el resto del mundo 345 millones.

En 2007 se produjeron 1,900 millones de toneladas y en el 2008 arriba de 2,000 millones de toneladas. La producción en México en el 2007 fue de 7.3 millones de toneladas, de las cuales 3.7 provienen del municipio del el Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada (CAMIMEX, 2008).

Dada la importancia estratégica que tiene el hierro para la economía de México y el mundo, es necesario proponer “guías de exploración indirectas” que sean rápidas y de fácil aplicación y que junto a las guías convencionales de exploración (controles litológicos y estructurales) podrían dirigir la exploración directa (perforación) con el fin de incrementar las reservas en las minas actualmente explotadas o identificar nuevos prospectos, donde los estudios regionales geológicos y geofísicos han señalado sitios con potencial para la exploración local de menas de hierro.

Para proponer tales “guías de exploración indirecta” se seleccionó la mina Peña Colorada que cuenta con uno de los yacimientos de hierro más importantes de México, cuya producción cubre necesidades nacionales que aumentan cada año debido al crecimiento urbano y tecnológico con una producción para el 2008 de 3, 668, 424 ton (CAMIMEX, 2008).

Como ya se mencionó Peña Colorada es uno de los sitios más estudiados, por lo que se propone el análisis de la información litológica y estructural generada en este sitio con el fin de identificar los controles litológicos y estructurales de la mineralización como las guías convencionales de exploración.

Una vez identificados estos controles litológicos y estructurales, se propone determinar parámetros cuya determinación sea rápida, fácil y de bajo costo como la susceptibilidad magnética y las concentraciones de metales de interés utilizando equipos portátiles, que son avances tecnológicos con los que actualmente se cuenta en el Instituto de Geología de la UNAM.

Se pretende encontrar la relación que existe entre los controles litológicos y estructurales con la susceptibilidad magnética y la concentración de los metales de interés para proponerlas como “guías indirectas de exploración” de menas de hierro y aplicarlas en una zona de los alrededores, con el fin de valorar la utilidad de dicha guías de exploración indirectas en nuevos prospectos.

Esto debido a que las anomalías geoquímicas y geofísicas se relacionan directamente con el modelo conceptual de la mineralización. (Peters 1978)

Las técnicas de análisis que se utilizarán en este trabajo de tesis (Fluorescencia de Rayos X portátil “NITON XL3t”, el Sistema MS2 de Bartington Instruments Ltd) han sido utilizadas con éxito en otros estudios (Lozano-Santa Cruz et al. 2009; Zamora O et al., 2009; Romero et al. 2010; Pérez I et al., 2009), y se ha demostrado que la determinación de los parámetros de interés es confiable, fácil, rápida y de bajo costo. Las determinaciones se pueden hacer “in situ” o en muestras de mano y no requieren preparación especial.

I. ANTECEDENTES

1.1 Aspectos relevantes del Hierro

Después del aluminio, el hierro es el metal más difundido en la corteza terrestre. Se encuentra en la naturaleza formando parte de minerales y rara vez se le encuentra como elemento nativo. Se estima su presencia en la corteza terrestre en un 5%, por lo que es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza y a su vez constituye el 35% del peso de todo el planeta.

Para los seres vivos, el hierro es un compuesto muy importante para el buen funcionamiento de las plantas y animales. En los animales, la presencia de hierro permite la formación de la hemoglobina y de los glóbulos rojos, lo que permite el adecuado transporte del oxígeno, en las plantas el hierro permite la creación de clorofila para realizar el proceso de fotosíntesis (Bateman, 1982).

Su uso industrial empezó después del año 800 a.C. y dicho hallazgo señala el comienzo de la edad del hierro.

El acero, que es el producto principal que se obtiene a partir del hierro, empezó a emplearse comúnmente en el siglo XIV. Se producía en alto horno, para entonces Gran Bretaña con sus recursos de hierro y hulla se convierte en la primera y más importante nación industrial moderna (Bateman, 1982)

Al mejorar la tecnología para producir hierro en forma controlada, se comenzaron a observar cambios sociales profundos. Las características físicas del hierro permitieron la fabricación de maquinarias más complicadas, estructuras más resistentes y otros muchos usos con los cuales el hierro se involucró directamente con la vida moderna del hombre.

A lo largo de la historia, forjar el hierro y aliarlo con otros metales ha significado una estrategia en el desarrollo de las civilizaciones como sucedió con el descubrimiento de los yacimientos de hierro del Lago Superior en 1844 en donde se inicia la época industrial de los Estados Unidos y surgieron como consecuencia extensos centros comerciales (Bateman, 1982), a partir de entonces la economía mundial prosperó, principalmente en el ámbito rural, por que el hierro era muy utilizado para la fabricación de arados, hoces, guadañas y forrajes para el ganado.

El grado de complejidad en la explotación de los yacimientos ha aumentado y la necesidad de conocerlos y estudiarlos es cada día mayor.

Actualmente, los yacimientos más grandes del mundo que se conocen en orden de mayores a menores en reservas son: los que se hospedan en rocas de edad cámbrica, como son los depósitos de hierro sedimentario (BIF) en el Lago Superior, en Estados Unidos y Canadá, los de Itabira, en Brasil (cuadrilátero ferrífero); los de origen magmático, en Kirunavaara Suecia; o en yacimientos asociados a brechas hidrotermales complejas, como el de Olympic Dam, en Australia. Otro depósito sedimentario son los depósitos de hierro oolítico. Éstos alcanzan volúmenes considerables y están constituidos por acumulaciones de hematita con textura oolítica a pisolítica (Corona-Esquivel, 2004).

Se sabe que las mayores concentraciones de Fe se encuentran en minerales como la magnetita con el 70% del total de su composición, aunque también se considera como minerales de mena la hematita, siderita y en menor grado limonita (Rose, 1979).

1.2 Importancia Económica del Hierro en México

En 1955 se consideró que México tenía un déficit considerable de hierro para su futuro desarrollo en comparación con países como Estados Unidos, debido a ello era conveniente explorar la Costa del Pacífico, en donde se sabía la existencia de yacimientos ferríferos, pues se habían estudiado anteriormente yacimientos en el Estado de Colima como La Huerta, Peña Colorada, Cerro la Mina, Cerro Náhuatl entre otros (SGM, 2008)

Debido al déficit reportado, se iniciaron los trabajos exploratorios en la Costa de Jalisco por parte de técnicos mexicanos y las brigadas de Naciones Unidas y con el tiempo comienzan a explotarse el Fe en el país para la producción del acero.

La producción mundial de hierro se ha ido incrementando en los últimos años. En el 2007 se registró una producción mundial de 1,900 millones de toneladas y en el 2008 una producción de arriba de 2,000. En México la producción del mineral fue de 7.3 millones de toneladas, de las cuales 3.7 se produjeron en Colima y 3.4 en Minatitlán. (CAMIMEX, 2008)

Esta producción de hierro ha permitido a México ser en segundo mayor productor de acero en Latinoamérica con 17.6 millones de toneladas en 2007.

El aporte de México al total latinoamericano en 2007 fue de 26.1%, siendo Brasil el primer productor de acero con 32.9 millones de toneladas (50.4% de la producción total) (CAMIMEX, 2008)

Como ya se mencionó, el 34% de la producción de hierro para la obtención del acero en México proviene del estado de Colima.

Ésta producción muestra un crecimiento paulatino como se ilustra en la figura 1.1.

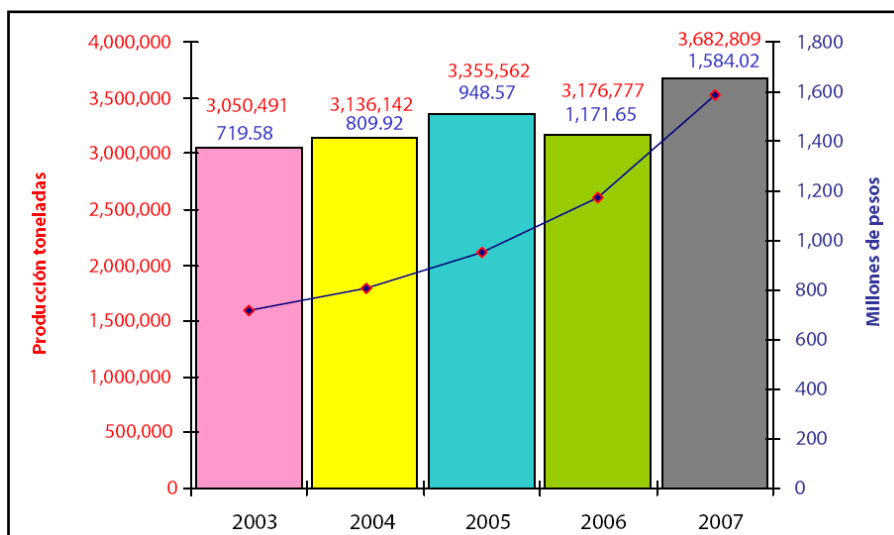


Figura 1.1 Volumen y valor de la producción de Hierro en Colima del 2003 al 2007. Tomado de SGM (2008)

Para finales del 2007 Colima registra reservas geológicas del mineral de hierro de 951.1 mt.

Los precios del mineral han incrementado año con año; por ejemplo, del 2007 al 2008 se registró un crecimiento del 65%. Dicho crecimiento compromete a las compañías involucradas en la producción de hierro a incrementar sus reservas y evaluar nuevos prospectos.

Por lo que como ya se mencionó es estratégico para la minería de hierro en el país, proponer “guías de exploración indirectas” que sean rápidas y de fácil aplicación y junto a las guías convencionales de exploración (controles litológicos y estructurales) podrían dirigir la exploración directa (perforación) con el fin de incrementar las reservas en las minas actualmente explotadas o la identificar nuevos prospectos, donde los estudios regionales geológicos y geofísicos han identificado sitios con potencial para la exploración local de menas de hierro.

Para tal propósito se seleccionó la mina Peña Colorada, con el fin de proponer “guías indirectas de exploración” mediante la determinación parámetros como la susceptibilidad magnética y concentración de metales de interés; y relacionarlas con los controles litológicos y estructurales de la mineralización que ya se explota con éxito en Peña Colorada y aplicar estas “guías indirectas de exploración” en una zona de los alrededores de la mina, (Zona ubicada a 15 km al sureste de la mina) con el fin de valorar la utilidad de dicha guías de exploración indirectas en nuevos prospectos.

1.3 Historia de la exploración y explotación de Peña Colorada

Los yacimientos metálicos de hierro toman importancia en el Estado de Colima con el descubrimiento de la mina Peña Colorada a mediados del siglo pasado (1867) cuando el ingeniero E. Braker Welda explora la zona occidental del país.

El yacimiento de hierro de Peña Colorada era conocido desde tiempos de la Colonia por los indígenas pobladores de la zona, pero no les era atractivo pues no sabían explorarlo, fundirlo y trabajarlo, por lo tanto no lo utilizaban. Posteriormente, a la llegada de los españoles fue cuando empezaron a emplearse los avances respecto al tratamiento y uso de ese metal.

No fue sino hasta finales del siglo XIX cuando Benito Juárez promueve el descubrimiento de los yacimientos de Peña Colorada, es por ello que el CMBJPC incluye dentro de su razón social el nombre de Benito Juárez.

Los primeros trabajos en el yacimiento de Peña Colorada (formalmente conocidos como prospecto El Mamey) fueron mencionados por Aguilera en 1914 y González-Reyna (1939, 1959), mencionados en el trabajo de Corona-Esquivel, 2004, quienes describieron la geología del área a nivel de reconocimiento.

En el año de 1939 el Dr. Genaro González Reyna realizó las primeras investigaciones geológicas de la región.

Posteriormente, en los años de 1956 y 1957 la Compañía Impulsora de Industrias Básicas S.A., realizó estudios geológicos y de perforación de diamante en los cuerpos de hierro de Peña Colorada.

De 1959 a 1965 el hoy SGM realizó estudios geológicos, magnetométricos, aeromagnéticos y evaluativos en Peña Colorada abarcando una superficie de 636 km² en donde localizan áreas anómalas de importancia para realizar trabajos de exploración geológica en un radio de unos 20 km alrededor de Peña Colorada.

Con la información anterior, se justificaron estudios de magnetometría terrestre regional y a detalle en diversas áreas de la zona de Minatitlán, Manzanillo y Coquimatlán que incluyen la zona ferrífera de Peña Colorada y alrededores.

En 1967 se fundó la Compañía Minera Peña Colorada, publicándose en 1970 el libro "Investigaciones Fundamentales para el Desarrollo del Proyecto" y con ello

inicia el desarrollo e instalación de su mina y planta en 1972 y empieza sus actividades de explotación y beneficio en 1975.

Corona-Esquivel 2004, reporta que la estratigrafía de la región fue descrita por Salazar-Mandujano (1983), la geología local y estudios geofísicos los realizó el Instituto Mexicano del Petróleo en 1987, Sánchez-Quiroz y Juárez en 1988 y Corona-Esquivel en 1993. También se realizaron trabajos con respecto al paleomagnetismo y la mineralogía por Rivas-Sánchez en 1991, Alva-Valdivia en 1991. Zürcher y colaboradores realizaron estudios geoquímicos en 1991 y 2004.

Otros trabajos relacionados con la explotación del yacimiento son aquellos del Plan de Minado 1990-1994 y 1993-1997 y han sido llevados a cabo por el Consorcio Minero Benito Juárez-Peña Colorada, S.A., y la evaluación de reservas por Chávez-Gaitán (1993). (Corona-Esquivel, 2004)

El Servicio Geológico Mexicano elaboró una carta magnética con clave E13-B33 que fue utilizada para empezar la perforación en la parte E-SE de Peña Colorada sin obtener los resultados que esperaban de acuerdo a las estimaciones realizadas a partir del aeromagnetismo. (CAMIMEX, 2008)

Cabe señalar que en un principio el CMBJPC no tenían permitido extraer el mineral del subsuelo, únicamente lo podían obtener de los rodados de los cuerpos mineralizados.

Actualmente, Peña Colorada es el yacimiento más grande en volumen de mineral de hierro en México con el 38.6% de reservas, sus recursos actualmente son del orden de 192 millones de toneladas con leyes de 26 a 35% de hierro magnético; las cuales son explotables para 40 años a un ritmo de explotación de 4, 750 000 toneladas anuales. (CAMIMEX, 2008)

Actualmente, produce 3 500, 000 toneladas de pellets al año para la industria siderúrgica nacional (Corona-Esquivel et al, 2004).

II. ASPECTOS FÍSICOS, GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO-MINEROS DE LA REGIÓN DONDE SE UBICA EL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Localización

El área de estudio comprende la zona de la mina Peña Colorada y una zona localizada a unos 15 km al SE, de esta mina, a la que denominaremos “Zona Sureste” (Fig. 2,1), donde estudios aeromagnéticos realizados por el COREMI (hoy Servicio Geológico Mexicano) han reportado la ocurrencia de anomalías de interés y similares a las de la mina Peña Colorada.

El área de estudio se localiza en la porción noroccidental del estado de Colima, en los límites con el estado de Jalisco, dentro de los municipios de Minatitlán y Cuautitlán de Barragán, a 7km de la población de Minatitlán, a 50km de Manzanillo, y 64km de Colima. Dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, en la Sierra del Mamey (Corona-Esquivel, 2004)

Esta región comprende los distritos mineros de Peña Colorada y Cerro Náhuatla, las zonas mineralizadas del Astillero, El Arrayanal y la Sidra.

2.2 Clima

Prevalece el clima tropical lluvioso comprendiendo los meses de junio a octubre. La precipitación más abundante se registra en los meses de julio a septiembre, durante las cuales son frecuentes las lluvias torrenciales de origen ciclónico. El estiaje abarca de noviembre a mayo. Debido a la posición respecto al mar y a las corrientes marítimas, el clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano A (W). La temperatura promedio de los últimos 25 años es de 25.8°C. La precipitación promedio es de 1,078mm y la evaporación potencial de la zona es de 1,663mm (CONAGUA, 2009).

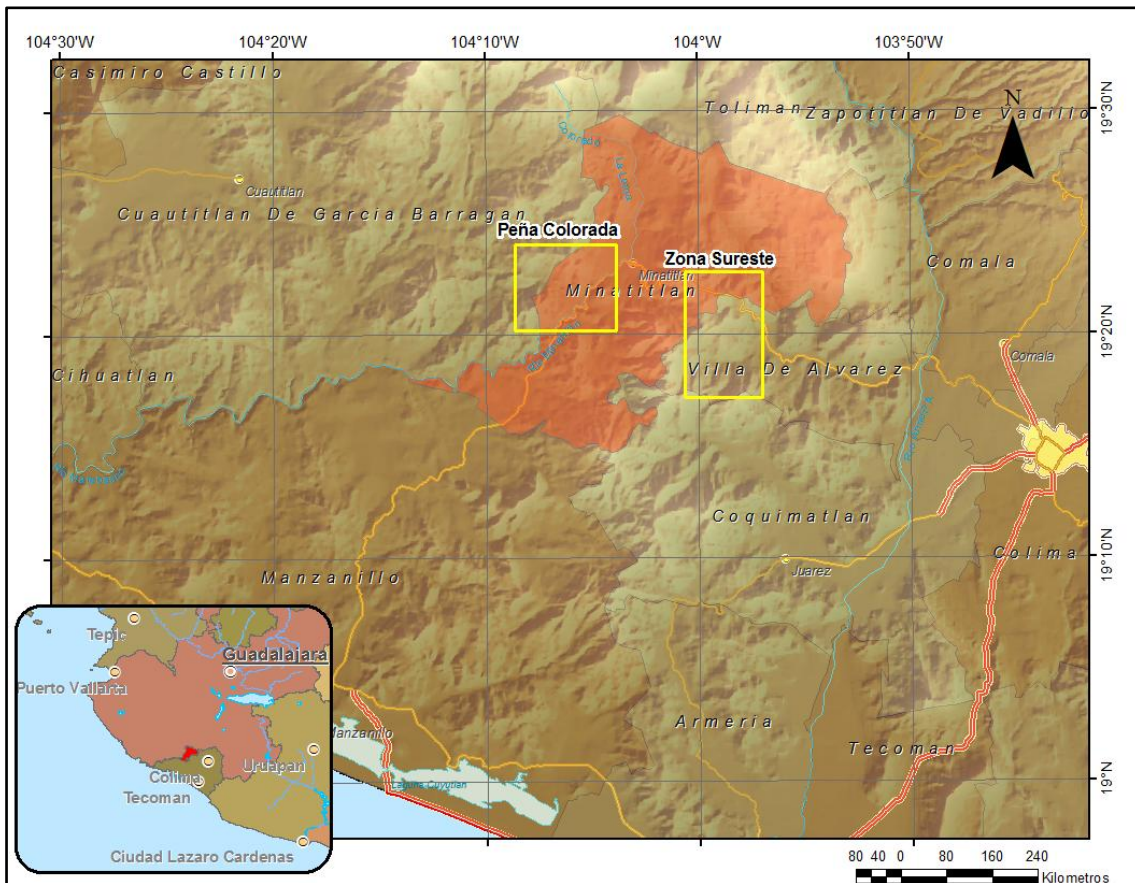


Figura 2.1 Localización del área de estudio. Mapa elaborado en CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) con ArcGis 9.2 utilizando información geográfica de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Autor: Danael Aceves Padilla.

2.3 Aguas Superficiales

Las corrientes hidrológicas perenes más importantes que recorren los alrededores del área de estudio son: río Armería, río Cihuatlán o Marabasco. El río Armería es el más importante del Estado por su extensión, por su escurrimiento y aportación a los acuíferos; nace en la sierra Cacoma del estado de Jalisco y desemboca en Boca de Pascuales en el Océano Pacífico, con un desarrollo de 294 km; éste río constituye una cuenca con superficie en Colima de 1836 km² y una descarga media anual de 1.1 millones de m³ de agua. El río Cihuatlán o Marabasco nace en el municipio de Autlán en Jalisco y desemboca en Barra de Navidad. (COREMI, 1994).

2.4 Fisiografía

Corona Esquivel et al (2004) describe al yacimiento Peña Colorada como parte de la Sierra de El Mamey, la cual se encuentra en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (Figura 2.2).

Esta provincia ocupa la parte centro-occidental del estado; colinda al noreste con Jalisco, al sur con el Océano Pacífico y al norte con el Eje Volcánico. Está subdividida en dos subprovincias denominadas Sierras de la Costa de Jalisco y Colima y subprovincia de la Cordillera Costera del Sur con superficie de 3 540 y 1 240 km² cada una respectivamente.

Esta Provincia Fisiográfica se caracteriza por tener una planicie costera muy estrecha, de unos 10 km promedio, excepto en el área inmediata a la desembocadura del río Tomatlán, en partes las montañas se aproximan tanto a la costa que prácticamente no existe la planicie costera. (Álvarez, 1958)

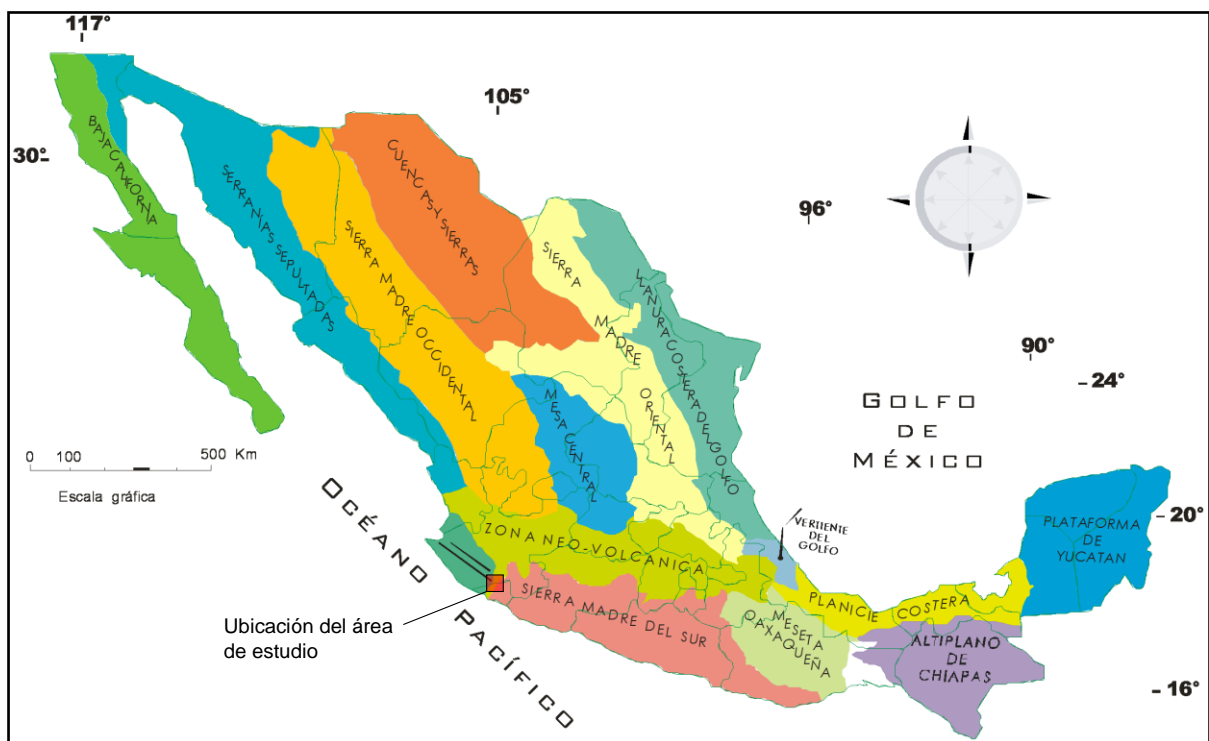


Figura 2.2 Provincias Fisiográficas de México.
(Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEG. 1991)

2.5 Geología Regional

A continuación se describen las formaciones que han sido definidas para la región donde se ubican las zonas de estudio que al mismo tiempo pertenece al sector Noroeste del terreno Náhuatl (Sedlock et al 1993), el cual consiste en rocas volcanoclasticas marinas, siliciclastos, plataformas carbonatadas flujos de andesitas brechas y tobas e intrusivos. La información que a continuación se describe fue tomada de los trabajos relazados por Corona Esquivel (2004) y el Instituto de Geología, UNAM (2009).

Comenzando en orden cronoestratigráfico de la más antigua a la más reciente, la columna estratigráfica de la región está constituida por rocas de las Formaciones Alberca, Tecalitlán, Madrid, Tepalcatepec, Tecomán y Cerro de la Vieja. Estas Formaciones han sido cortadas por una serie de intrusivos y diques de composición variada (Figura 2.3).

Formación Alberca (Cretácico Inferior, Berriasiano-Hauteriviano)

Esta Formación está constituida por calizas y estratos delgados, lutitas negras y tobas que en la parte superior cambian transicionalmente a flujos de lava andesítica-basáltica intercalados con calizas y lutitas. El espesor reportado es de unos 1800m.

Formación Tecalitlán (Cretácico Inferior, Hauteriviano-Aptiano)

Concordantemente sobre la anterior, se dispone la Formación Tecalitlán constituida por rocas vulcanosedimentarias, con flujos andesíticos, flujos piroclásticos riolíticos, areniscas y conglomerados, con un espesor entre 1,200 y 2,000 metros.

Formación Madrid (Cretácico Inferior, Albiano)

Esta Formación está constituida por calizas arcillosas y lutitas carbonosas que cambian lateralmente a yesos y que afloran en las cercanías de la estación de ferrocarril Madrid en el estado de Colima. El espesor reportado para esta formación es de uno 800 m.

Está dividida en dos miembros: el primero está formado por calizas arrecifales, calizas arcillosas y lutitas carbonosas y el segundo formado por yesos en estratos de espesor medio y rocas evaporíticas. Yace en aparente concordancia sobre la Formación Tecalitlán.

Formación Tepalcatepec (Cretácico Inferior, Albiano-Cenomaniano)

Consiste en una secuencia volcánico-sedimentaria de capas gruesas masivas de caliza, caliza arcillosa, lutita, caliza arenarcillosa, arenisca, limolita, toba, conglomerado, y derrames andesíticos.

Su espesor varía es de 2500 – 3000 m y ha sido dividida en facies de banco y facies volcánico-sedimentaria. Ambas facies se inician con una alternancia de areniscas, conglomerados, lutitas y limolitas. La facies de banco está constituida por capas gruesas a masivas de calizas de plataforma. Incluye también potentes espesores de conglomerados gruesos de matriz calcárea. La facies volcánico-sedimentaria la forman las brechas andesíticas a tobáceas con intercalaciones de delgados estratos calcáreos.

La Formación Tepalcatepec cambia transicionalmente a areniscas, limonitas y conglomerados de color rojo, depositados en un ambiente fluvial. Estos se definen al NE de Tecomán como **Formación Tecomán** y contienen zircones detríticos con edades alrededor de los 98-99 Ma, lo cual sugiere que esta sedimentación corresponde a la regresión marina del límite Albiano-Cenomaniano.

Formación Cerro de la Vieja (Cretácico superior, Campaniano)

Descansando en forma discordante (discordancia angular) sobre las formaciones anteriores aflora en la región la Formación Cerro de la Vieja, constituida por una sucesión de conglomerados con clastos de caliza, arenisca y limonita depositadas en un ambiente fluvial y de abanicos aluviales.

Rocas intrusivas (Cretácico Superior-Terciario)

La secuencia cretácica está cortada por el Batolito Manzanillo de composición granodiorítico con presencia de plagiogranitos y gabros. Suelen contener biotita, hornblenda, magnetita, esfena, apatita y zircón. (Tritlla *et al*, 2003)

Por último en el área de Peña Colorada, toda ésta serie está cortada por diques de pórfidos andesíticos de posible edad Terciaria. Tienen inclinación cercana a la vertical y fueron emplazados en fracturas de dirección principal N y NW. Estos diques carecen de mineralización económica de hierro y están afectados por una cloritización incipiente.

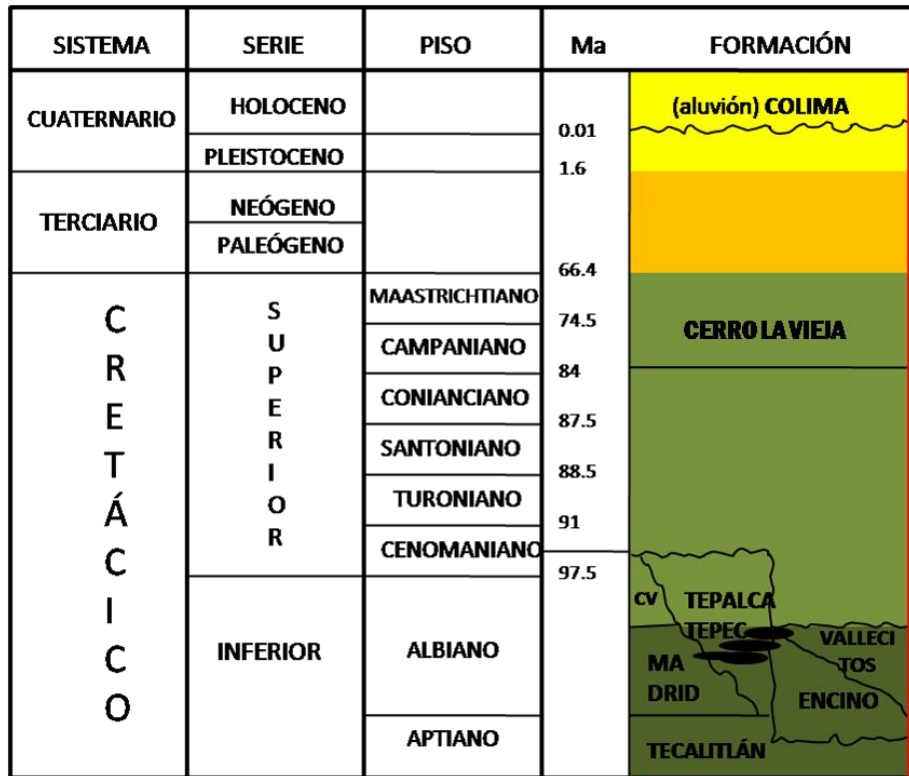


Figura 2.3 Columna Estratigráfica de la Geología Regional

2.6 Evolución geológica

El evento geológico más antiguo que se conoce en Colima es el originado por la orogenia Nevadiana que afectó las rocas metamórficas correspondientes a gneises y esquistos y a rocas vulcanosedimentarias del Cretácico inferior y medio depositadas en un medio submarino que corresponden a un arco volcánico insular asociado a cuencas submarinas. Por correlación lateral de algunas formaciones se supone la acreción del terreno Náhuatl (Sedlock et al, 1993) al continente antes del siguiente episodio orogénico conocido como Orogenia Laramide que tuvo origen en el cretácico Medio y Superior y trajo consigo la formación de rocas plutónicas que plegó, fracturó e intrusionó a sedimentos preexistentes depositados en una amplia plataforma con pequeñas depresiones.

Actualmente la cubierta pelítica calcárea y volcanoclástica del Cretácico Inferior está erosionada, quedando el macizo granítico descubierto observándose sólo colgantes rocosos sedimentarios e ígneos extrusivos localizados principalmente en la porción occidental del estado.

Sedimentos del Cretácico Medio y Superior así como del Terciario Inferior, se depositaron en la cuenca de Colima que se caracteriza por presentar cuencas intermontanas cerradas, ubicadas en la porción central de la entidad. Estas formaciones de rocas sufrieron las consecuencias de un evento geológico ocasionado por la orogenia Laramide, caracterizada por presentar esfuerzos compresionales que forman plegamientos y fallamientos inversos con fuerte emisión de vulcanismo y masas intrusivas en todo el territorio del estado.

Al finalizar el Neógeno se registró un tercer movimiento debido a la Orogenia Cascadiana, que se caracterizó por presentar esfuerzos tensionales que produjeron plegamientos y fallamientos normales en forma de bloques escalonados (fosas y pilares), así como por la formación de rocas ígneas extrusivas originadas durante la erupción del Nevado y volcán de Colima, depositadas principalmente en el valle de Colima y cañones de la entidad. (COREMI, 1994)

2.7 Geología Local del área de estudio: Zona Peña Colorada Zona Sureste

La información que a continuación se presenta fue tomada del estudio geológico-estructural que realizó el Instituto de Geología de la UNAM (IGL, 2009), en la Zona Peña Colorada y Zona Sureste.

En Peña Colorada la estratigrafía es distinta a la de la Zona Sureste. En Peña Colorada afloran rocas de la Formaciones “Tepalcatepec” y “Cerro la Vieja”, que conforman la porción superior de la columna estratigráfica de la región. En cambio, en el área localizada a unos 15 km al SE de Peña Colorada afloran rocas que posiblemente se relacionan con la Formaciones “Madrid”, “Tepalcatepec” y “Tecomán”, que constituyen la parte inferior media de la columna estratigráfica regional.

Sin embargo, en un contexto tectónico, tanto la zona de Peña Colorada como la “Zona sureste” se ubican en altos estructurales con un rumbo NE-SW, separados por el graben de Minatitlán, y limitados por fallas normales regionales. Ambas zonas fueron afectadas por los mismos eventos tectónicos, por lo cual comparten algunas estructuras o presentan sistemas de fallas con las mismas orientaciones.

2.7.1 Estratigrafía de Peña Colorada

La estratigrafía del área de Peña Colorada incluye depósitos aluviales recientes y rocas de secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias del Cretácico que están cortadas por rocas intrusivas de variada composición.

A) Formación Tepalcatepec (Cretácico Inferior, Albiano-Cenomaniano)

Es una secuencia vulcanosedimentaria que aflora en el centro y noreste del área comprendida en el mapa geológico (Figura 2.4), así como en el extremo sureste de mismo. Se distinguen tres miembros:

A.1) Miembro Inferior calcáreo, constituido por caliza con estratificación media a gruesa, de color gris claro, con algunos lentes de caliza arrecifal.

A.2) Miembro Medio calcáreo-arcilloso, constituido por un paquete de calizas arcillosas intercaladas con lutita y areniscas volcánicas. Hacia la cima, la secuencia calcáreo arcillosa es sobreyacida por un paquete de litarenitas volcánicas intercalada con delgados estratos de lutita de color café. Es muy común que la sucesión de caliza y volcaniclásticos se encuentre mineralizada principalmente por magnetita y de manera subordinada por pirita

A.3) Miembro Superior volcánico, constituido por andesitas de estructura fluidal. Generalmente estas rocas presentan silicificación y muestran algunas vetillas de cuarzo.

La mineralización de Fe de Peña Colorada está encajonada en las intercalaciones de andesitas con calcita. Se reportan tres tipos principales de mineralización de Fe: i) Cuerpo masivo de magnetita. ii) Cuerpo de magnetita diseminada. iii) Brecha mineralizada

- i) Cuerpo masivo de magnetita: El cuerpo masivo está constituido esencialmente por magnetita, presenta morfología tabular, un espesor máximo de ~40 m, extensión lateral de >1000 m, y una disposición subparalela respecto a la estratificación de los flujos de andesita y rocas carbonatadas encajonantes de la Formación Tepalcatepec.

El cuerpo masivo está constituido por cristales subedrales a euedrales de magnetita en más de un 85%, parcialmente reemplazados por hematites por medio de martitización, y presenta contenidos

subordinados de pirita, calcopirita, feldespatos potásicos, piroxenos (básicamente diópsido-hedenbergita), clorita, apatita, y carbonatos



Figura 2.4 Fotografía del tajo en Peña Colorada (Andesitas/Masivo)

- ii) Cuerpo de magnetita diseminada: El cuerpo diseminado es igualmente subconcordante a la estratificación local y se dispone de forma subparalela unos 40 m por debajo del cuerpo masivo. Se estima un espesor de mayor a 200m. A éste cuerpo se le han calculado un promedio de 26% de magnetita.
- iii) Brecha Polimíctica o Brecha Hidrotermal: Se considera como último cuerpo mineralizado por que claramente corta los cuerpos masivo y diseminado. La brecha es subvertical, tiene unos 25 m de potencia como mínimo y está formada por bloques angulosos de andesita, granodiorita, aplita y magnetita masiva textura gruesa y una matriz de magnetita y pirita de grano fino.

B) Formación Cerro de la Vieja (Cretácico superior, Campaniano)

Esta formación está constituida por conglomerados y areniscas de color rojizo que aflora en la parte central, noroeste y sureste del área.

El conglomerado es mal clasificado, constituido por fragmentos sub-redondeados primordialmente de andesita y en menor proporción por clastos de caliza, toba y roca volcánica que están soportados por una matriz areno-gravillenta y en ocasiones están cementados por calcita que se intercala con lentes delgados de areniscas de grano grueso.

La Formación Cerro de la Vieja sobreyace discordante a los miembros superior y medio de la Formación Tepalcatepec, y localmente también por contacto tectónico

C) Cuerpos intrusivos

Se distinguen tres cuerpos intrusivos principales:

C.1) Intrusivo diorítico

Estas rocas afloran en la porción central y centro-oriental del área. La textura primaria es fanerítica y está formado por cristales de anfíbol, feldespato potásico, plagioclasa, algo de cuarzo y minerales ricos en hierro. Esta roca presenta una alteración potásica que originó minerales secundarios como feldespatos potásicos, epidota, clorita, sericita, magnetita y pirita.

Este intrusivo se emplaza tanto en las rocas volcanosedimentarias de la Formación Tepalcatepec como en las conglomeráticas de la formación Cerro de la Vieja.

C.2) Intrusivo y Diques Monzoníticos

El intrusivo monzonítico aflora en la parte sureste del área de la mina de Peña Colorada. La textura es fanerítica y está formado por plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico. En algunas ocasiones contiene algo de biotita.

Este intrusivo muestra zonas de alteración argílica (zonas con abundante caolín). Las relaciones de campo permiten establecer que se encuentra intrusionando a la secuencia volcanosedimentaria, al conglomerado y a la diorita, ya que ésta última es afectada por diques de la misma composición. No presenta mineralización de magnetita secundaria, por lo que se infiere que es posterior al evento de mineralización.

Los diques monzoníticos afloran principalmente hacia el centro-sur del área cartografiada, La composición de estos diques es similar a la del intrusivo monzonítico. Se emplazan preferentemente a lo largo de planos de fallas que tienen un rumbo WNW-ESE y afectan principalmente al intrusivo diorítico, a la brecha mineralizada, a la secuencia volcanosedimentaria mineralizada con magnetita y al conglomerado. Esto sugiere que son posteriores al evento de mineralización

C.3) Diques andesíticos

Se pueden encontrar distribuidos en toda el área. Son diques subverticales, de un característico color verde oscuro y que tienen textura afanítica o porfídica. Los

principales componentes minerales son plagioclasa y hornblenda euedral, y como minerales secundarios presentan localmente algo de magnetita diseminada.

La mayor parte de estos diques tienen un rumbo NNW-SSE aprovechando, en algunos lugares, zonas de falla con esta dirección. También se puede ver otro sistema de diques que tienen un rumbo NW-SE pero son menos frecuentes.

2.7.2 Geología Estructural de la zona Peña Colorada

Las estructuras de primer orden que afectan el área de Peña Colorada son las fallas Minatitlán, Autlán (o Jala), La Encantada, El Mamey, Nido del Águila, y La Chula (Fig. 2.4). De este conjunto de fallas de expresión regional se desprenden el conjunto de fallas de segundo orden que controlan la ubicación espacial de los cuerpos mineralizados.

En la figura 2.4 se observa que el área mineralizada de Peña Colorada se localiza en un alto estructural de segundo orden delimitado al oriente por la falla Minatitlán, dando lugar al graben del mismo nombre, y al poniente por la falla El Mamey. El límite sur es la falla regional Autlán, la cual rompe estructuralmente con la zona de mineralización. Finalmente, el horst de Peña Colorada se encuentra afectado por una serie de fallas de segundo orden en orientación WNW-ESE (p. ej. Falla Nido del Águila) y NE-SW (p. ej. Falla Poniente) que desplazan tanto la columna estratigráfica como los niveles de mineralización

De forma similar a los dominios estructurales identificados regionalmente, a escala local se definieron cinco sistemas de fallas con base en su orientación preferencial: (i) N-S a NNW-SSE, (ii) WNW-ESE, (iii) E-W, (iv) NW-SE, y (v) NE-SW.

Los sistemas N-S y WNW-ESE afectan a las rocas sedimentarias cretácicas. De estos dos sistemas, el que tiene estructuras con orientación WNW-ESE controla el emplazamiento de las mineralizaciones. Estas estructuras aparentemente se comportan como límites de bloques con mineralización. Como ejemplos se pueden mencionar a los tajos de La Chula y La Negra, en Peña Colorada

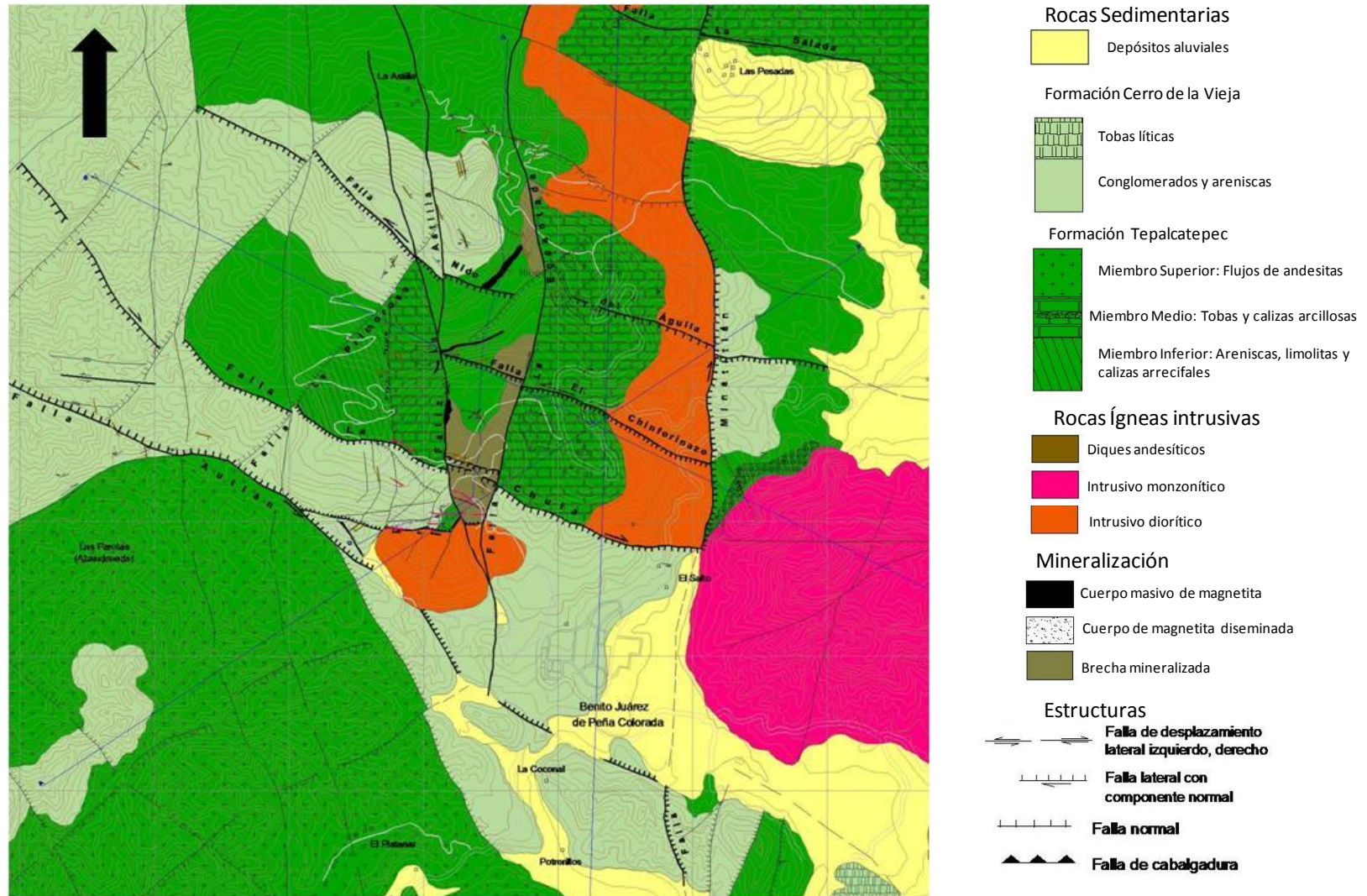
Los sistemas con rumbo E-W son de menor magnitud y se manifiestan con cinemática lateral de sentido izquierdo. Su distribución es de manera local y no forman un sistema tan denso.

El sistema de fallas NW-SE tiene menor densidad comparado con otros sistemas de falla. Las fallas con rumbo NE-SW son las estructuras que predominan y, junto con

el sistema WNW-ESE reactivado, controlan la distribución actual de los horsts y grabens en los cuales se encuentra emplazada la mineralización.

Sedlock et al 1993 asocia las fallas normales con rumbo NW, EW y NE a la tensión N-S relacionada con la subducción de cocos, así también infiere que las fallas laterales N-S a NNW-SSE son el resultado de la transpresión del Neógeno.

Figura 2.5 Mapa Geológico de Peña Colorada (Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009))



2.7.3 Estratigrafía de la Zona Sureste

Al igual que en Peña Colorada, la estratigrafía de la Zona Sureste incluye depósitos aluviales recientes y rocas de secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias del Cretácico que están cortadas por rocas intrusivas de variada composición.

Sin embargo, en la Zona Sureste aflora la parte inferior-media de la columna estratigráfica regional, en contraste con la zona de Peña Colorada, donde afloran rocas de la porción superior de la columna cretácica.

El evento geológico más temprano en la Zona Sureste es el depósito de la Formación Madrid (que no aflora en Peña Colorada), seguido del depósito de la Formación Tepalcatepec (presente en ambas zonas), en el Cretácico Temprano. En Zona Sureste afloran los depósitos continentales de la formación Tecomán, los cuales no están presentes en la zona de Peña Colorada.

Otra diferencia entre las dos zonas de estudio es que los conglomerados rojizos de la formación Cerro de La Vieja no afloran en la Zona Sureste y solamente forman parte de la columna estratigráfica de Peña Colorada donde yacen discordantemente sobre la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Tepalcatepec.

Rocas Sedimentarias

Formación Madrid (Cretácico Inferior, Albiano)

En el área hay solo un pequeño afloramiento de yesos y anhidrita de estructura masiva, que intemperiza en color gris amarillento. Dicho afloramiento se encuentra en la margen sureste del mapa (Fig. 2.5) y forma lomeríos suaves, de poca elevación. Estas evaporitas forman un diapiro que intrusión a calizas, el espesor máximo observado en el campo es de 60m y no aflora su base.

Formación Tepalcatepec (Cretácico Inferior, Albiano-Cenomaniano)

En la Zona SE aflora un paquete de calizas asociada a esta Formación. La base de esta secuencia calcárea corresponde con calizas de estratificación gruesa o calizas masivas de color gris al intemperismo. En la mayoría de los afloramientos está recristalizada. Como estructuras secundarias muestra vetas de calcita y algunas vetas de magnetita y de pirita. Por encima de este intervalo de calizas masivas, cambian de manera transicional a un intervalo de calizas con estratificación delgada intercaladas con delgados horizontes de lutitas de color café. Estas calizas tienen ocasionalmente interestratificaciones de areniscas muy finas, con matriz calcárea (tobas?) con estratificación delgada. Toda la unidad presenta numerosas vetas de calcita paralelas a la estratificación. De corroborarse su afinidad con la Formación Tepalcatepec, las calizas corresponderían al Albiano-Cenomaniano.

El contacto con la unidad superior de rocas clásticas (Formación Tecomán) es concordante y transicional, dado que hacia la cima se va incrementando el componente terrígeno y los estratos son paralelos. El espesor máximo aproximado de las calizas de la Formación Tepalcatepec en la Zona SE es de 320 m.

Dentro de las estructuras de alteración que se observaron en el área se encuentran un bandeamiento subparalelo a la estratificación, formado por vetas de calcita y vetas de pirita y magnetita, que a la cima cambia a una textura pseudoboudinada, formada por un reemplazamiento de la caliza por sílice y minerales arcillosos.

Formación Tecomán (Cretácico Inferior, Albiano-Cenomaniano)

Constituida por conglomerados y areniscas que afloran en el sector sur-centro y hacia el nororiente de la zona de interés y se distinguen por su color rojo al intemperismo. Se infiere que este paquete corresponde a la Formación Tecomán porque se encuentra en contacto concordante y transicional con las calizas de la Formación Tepalcatepec que la subyacen. Además es un cuerpo de poco espesor, que está cubierto de manera concordante por calizas arrecifales.

Litológicamente está constituida por areniscas de estratificación media a gruesa y en ocasiones masiva, cuyo tamaño de grano varía de fino a medio, sub-redondeados a redondeados, compuesta predominantemente por feldespatos y clastos líticos volcánicos soportados por una matriz limosa. Los estratos de areniscas alternan con estratos lenticulares de conglomerados formados por clastos líticos subredondeados a

angulosos de caliza, andesita, y arenisca fina, con algunos clastos de cuarzo en una matriz arenosa-limosa, y presentan una gradación incipiente o sin gradación.

Esta secuencia de areniscas y conglomerados está cubierta por derrames de composición andesítica que la sobreyacen de manera concordante.

Rocas Ígneas

A) Derrames andesíticos

Sobreyaciendo de manera concordante a las areniscas y conglomerados de la Formación Tecomán, se encuentra un grueso paquete de derrames de lava de composición andesítica, que se localiza en la porción suroeste del área (Fig. 2.5). Se desconoce el espesor total de este paquete de lavas ya que su cima no aflora. Esta unidad es intrusionada por el cuerpo gabroico-granodiorítico que inclusive contiene xenolitos de la lava, y es cortado por el intrusivo traquítico-dacítico y por los diques andesíticos más jóvenes. Por su posición estratigráfica se infiere que este cuerpo es de edad Albiano-Cenomaniano.

B) Cuerpos ígneos intrusivos

B.1) Intrusivo Hipabisal Andesítico

Emplazado tanto en las calizas de la Formación Tepalcatepec como en la Formación Tecomán se encuentra una roca ígnea hipabisal. Es una roca ígnea de color verdoso, de estructura masiva, que tiene una textura porfídica. Presenta distintos grados de intemperismo y alteración, por lo cual es difícil identificarla en afloramiento. Este cuerpo contiene magnetita diseminada en distintas proporciones, también contiene vetillas y vetas de magnetita. Esta roca constituye una proporción considerable del área norte de estudio (Fig. 2.5).

B.2 Intrusivo Gabroico a Granodiorítico

Estas rocas afloran en toda el área, de forma irregular. Su textura y composición son muy variables. La roca es de color verde oscuro en superficie fresca, su textura es fanerítica, con abundantes cristales prismáticos de plagioclasas y piroxenos. Los minerales primarios identificados al microscopio son: plagioclasa, feldespatos potásico, hornblenda, diópsido, hedenbergita, y abundante magnetita y pirita primarias. Así mismo, presenta de manera frecuente, magnetita secundaria diseminada, vetas de

magnetita y cristales de apatito. Presenta abundantes minerales originados por la alteración.

B.3 Intrusivo Hipabisal Traquítico-Dacítico

Hacia la parte sureste del área aflora un cuerpo intrusivo hipabisal de composición ligeramente más félsica que el cuerpo andesítico. Bajo el microscopio, láminas delgadas de esta roca intrusiva muestran una textura porfídica-traquítica que contiene abundantes fenocristales de plagioclasa y sanidino, y escaso cuarzo. También intrusión a las rocas sedimentarias de las formaciones Tepalcatepec y Tecomán. Contiene muy escasa magnetita diseminada.

B.4 Diques andesíticos-basálticos

Los diques más jóvenes se presentan en toda el área. Son diques de composición andesítica de color verde oscuro en superficie fresca, con una textura afanítica. La orientación de estos diques es generalmente norte-sur y noroeste-sureste, con buzamiento al este. Algunos de estos diques que están afectando a las rocas calcáreas, tienen magnetita diseminada aunque no es abundante.

2.7.4 Geología estructural de la Zona Sureste

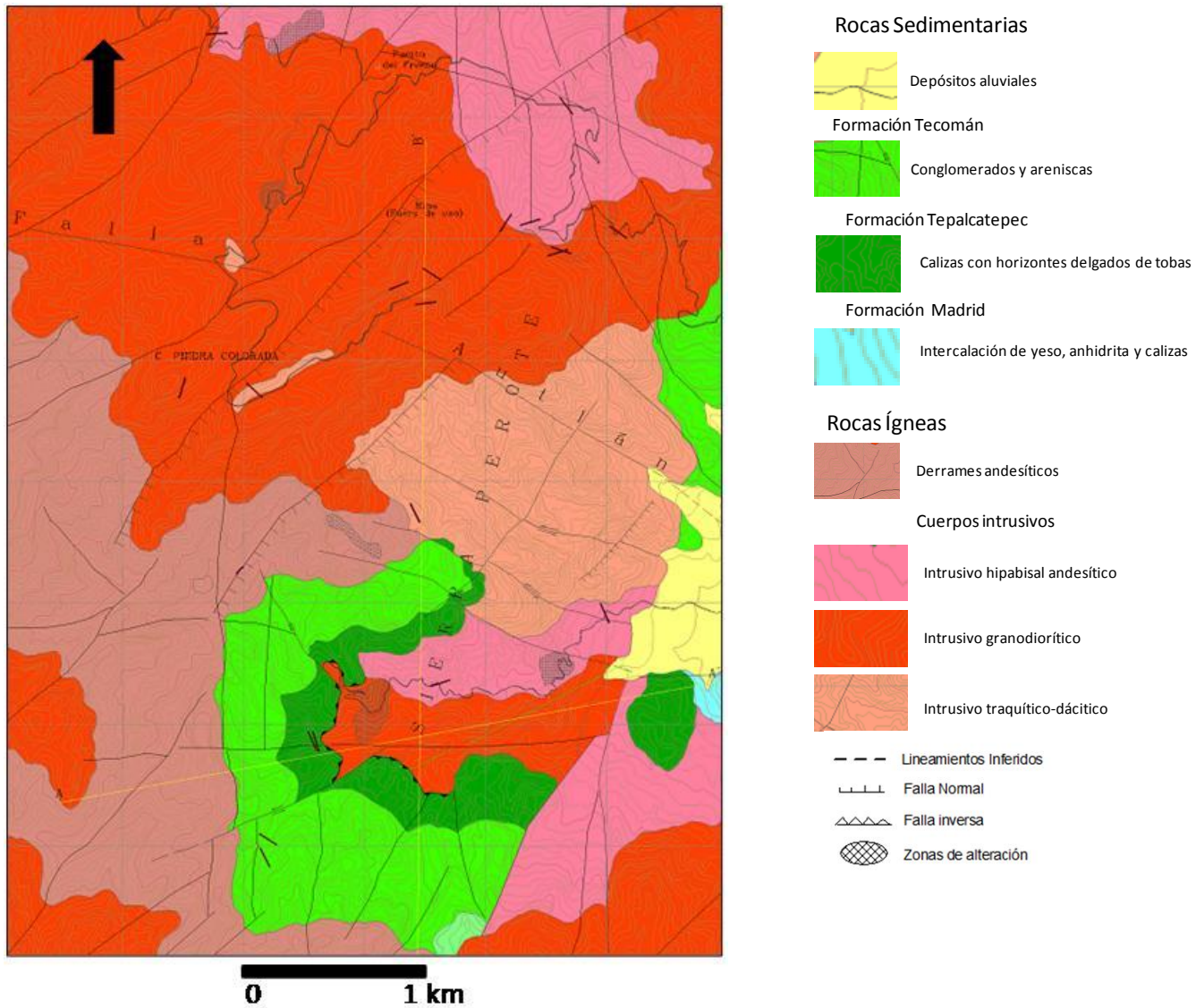
En un contexto tectónico, tanto la zona de Peña Colorada como la Zona sureste se ubican en altos estructurales con un rumbo NE-SW, separados por el graben de Minatitlán, y limitados por fallas normales regionales. Ambas zonas fueron afectadas por los mismos eventos tectónicos, por lo cual comparten algunas estructuras o presentan sistemas de fallas con las mismas orientaciones.

En esta Zona Sureste se definieron cinco sistemas con base en su orientación preferencial: (i) NW-S, (ii) N-S, (iii) NE-SW; (iv) ENE-WSW; (v) WNW-WSE y (vi) ENE-WSW

De estos sistemas, el que tiene estructuras con orientación WNW-ESE controla el emplazamiento de las mineralizaciones. El sistema WNW-ESE, es de carácter regional y se comportan como límites de bloques con mineralización en la Zona de Peña Colorada.

El sistema con rumbo NE-SW son las estructuras que predominan en ambas áreas y, junto con el sistema WNW-ESE reactivado, controlan la distribución actual de los horsts y grabens en los cuales se encuentra emplazada la mineralización.

Figura 2.6 Mapa Geológico de la Zona Sureste (Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009))



III. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Trabajo de campo

- 1 Se realizaron recorridos geológicos en las dos zonas de estudio para identificar las unidades litológicas y rasgos estructurales dominantes.
- 2 Utilizando un GPS marca Garmin, se colectaron un total de 186 muestras de mano (rocas): 81 muestras en la zona de Peña Colorada y 105 muestras en la Zona Sureste (Figura 3.1).
- 3 Cada muestra fue descrita respecto a sus características físicas (color, tamaño de grano o de minerales, estado de la roca (fresca o intemperizada), mineralogía, posible origen y respuesta al imán de campo.

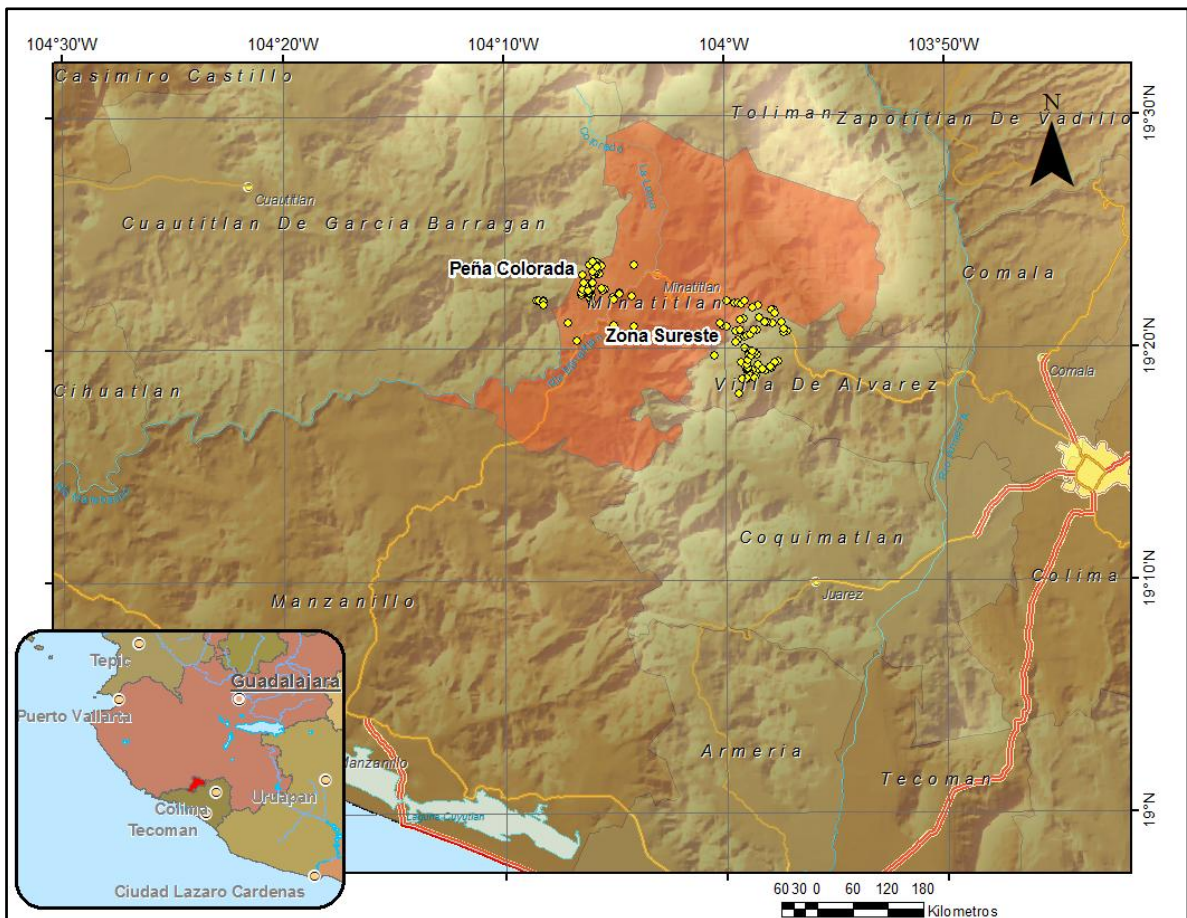


Figura 3.1. Puntos de muestreo. Mapa elaborado en CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) con ArcGis 9.2 utilizando información geográfica de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Autor: Danael Aceves Padilla.

3.2 Laboratorio

1. Se organizaron las muestras en bases de datos que contuvieran toda la información tomada en campo y se realizó un inventario de muestras con la finalidad de tener un control de las mismas.
2. Se analizaron todas las muestras respecto a la susceptibilidad magnética (3 mediciones por muestra), concentración total de metales (4 a 5 mediciones por muestra).
3. Utilizando los resultados de esos análisis se obtuvo la mediana respecto al hierro y las muestras que tuvieron valores por encima de la mediana fueron seleccionadas para realizar mediciones a detalle, éstas muestras se les denominó anómalas respecto al hierro.
4. Para las mediciones a detalle fue necesario homogenizar la muestra quebrándola y moliéndola en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS).
5. La muestra ya homogenizada tuvo el mismo proceso de análisis que en la muestra de mano, utilizando esos resultados se generaron los mapas de abundancia de elementos que se muestran en el capítulo 4 y se seleccionaron las muestras para realizar la Difracción de Rayos X, ésta selección fue de acuerdo a la relación entre altos y bajos valores respecto a susceptibilidad magnética y abundancia de hierro.
6. Las 6 muestras seleccionadas para realizar Difracción de Rayos X fueron molturadas en un mortero de alumina para poder ser leídas por el Difractómetro.

3.3 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética es una medida de la facilidad con que un material es magnetizado y depende de los minerales magnéticos presentes (magnetita, ilmenita, etc.), su concentración y características; y se determina a través de la siguiente ecuación:

$$K = M/H$$

Donde, “M” es la magnetización inducida por el campo magnético aplicado “H” y “K” es la susceptibilidad magnética volumétrica del material al que se le aplica “H”. En este estudio, la determinación de la susceptibilidad magnética (K) se realizó utilizando el susceptibilímetro MS2 de Bartington Instruments Ltd. y los sensores MS2D y MS2B (Figura 3.2)



Figura 3.2. susceptibilímetro MS2 y los sensores MS2D y MS2B Utilizados en este estudio

El MS2D es un sensor de campo que se utilizó para medir la susceptibilidad magnética volumétrica (K) en todas las muestras de mano que se colectaron (n = 189).

A partir de la medición “pura” obtenida con el susceptibilímetro (valor mostrado en display, VD) se calculó el valor de κ utilizando la siguiente ecuación:

$$\kappa = \frac{VD \times 10}{\text{volumen Muestra}}, [10^{-5} SI]$$

Considerando los valores promedio este parámetro (K), se seleccionaron las muestras donde el valor de (K) fue superior al valor promedio para cada zona. Estas muestras seleccionadas (51) se quebraron, molieron, cuartearon y

homogenizaron para realizar análisis más representativos (susceptibilidad magnética específica).

Utilizando el sensor de laboratorio MS2B se determinó la susceptibilidad magnética específica “ χ ” en las muestras seleccionadas ($n = 51$) que una vez homogenizada, se colocaron en cubos de $1'' \times 1'' \times \frac{3}{4}''$ para su análisis.

A partir de la medición “pura” obtenida con el susceptibilímetro (valor mostrado en display, VD) se calculó el valor de χ utilizando la siguiente ecuación:

$$\chi = \frac{VD \times 10}{\text{pesoMuestra}} \cdot [10^{-8} m^3 kg^{-1}]$$

La “ χ ” es el parámetro por excelencia utilizado en Magnetismo para estimaciones de concentración magnética, su principal ventaja reside en su económica y rápida determinación. No obstante, debe tenerse en cuenta que dicho parámetro es una respuesta conjunta de todos los minerales magnéticos presentes.

3.3.1 Concentración total de metales

La determinación rápida y confiable de las concentraciones totales de los metales base de interés económico en los yacimientos minerales es de vital importancia para la toma de decisiones en la industria minero-metalúrgica en las etapas de exploración, explotación, beneficio y refinación. Para dar respuesta a esta necesidad se han diseñado y fabricado equipos portátiles para análisis por Fluorescencia de Rayos X (PFRX).

Para determinar las concentraciones totales de metales de interés en este estudio se determinaron por Fluorescencia de Rayos X, utilizando un equipo portátil de última generación "NITTON XLt3" (Figura 3.3)



Figura 3.3. Equipo Fluorescencia de Rayos X, portátil (NITTON XLt3)

En todas las muestras de mano ($n = 183$) se determinaron las concentraciones totales de hierro.

Considerando los valores promedio de la concentración de Fe en el total de muestras, se seleccionaron las muestras donde la concentración de Fe fue superior al valor promedio para cada zona. Estas muestras seleccionadas (51) se quebraron, molieron, cuartearon y homogenizaron para realizar análisis más representativos.

Utilizando la misma técnica de análisis (Fluorescencia de Rayos X, utilizando un equipo portátil de última generación "NITTON XLt3") en las muestras seleccionadas ($n = 1$) se determinaron las concentraciones totales de Antimonio (Sb), Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Plomo

(Pb), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Potasio (K), Rubidio (Rb), Plata (Ag), Estroncio (Sr), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Zinc (Zn) y Zirconio (Zr). Los límites de la detección de éstos elementos se muestran en la tabla 4.1

3.3.2 Composición mineralógica

En un total de 6 muestras representativas de las dos zonas de estudio, se determinó la composición mineralógica utilizando la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). Se utilizó un Difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con filtro de Ni, tubo de cobre y monocromador.

Figura 3.4 Límites de detección del Equipo Fluorescencia de Rayos X, portátil (NITTON XLt3)

Elemento	Símbolo	Límite de detección, mg/kg
Antimonio	Sb	40
Arsénico	As	7
Bario	Ba	84
Cadmio	Cd	12
Calcio	Ca	205
Cromo	Cr	150
Cobalto	Co	60
Cobre	Cu	50
Hierro	Fe	60
Plomo	Pb	3.7
Manganeso	Mn	70
Molibdeno	Mo	10
Níquel	Ni	114
Potasio	K	200
Rubidio	Rb	10
Plata	Ag	10
Estroncio	Sr	10
Estaño	Sn	60
Titanio	Ti	50
Zinc	Zn	50
Zirconio	Zr	10

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Peña Colorada

4.1.1 Muestras de Mano

El rango de valores de susceptibilidad magnética de las 81 muestras de mano en la zona de Peña Colorada (figura 4.2) varía entre 98 y 19744 x 10⁻⁵ SI y la concentración de Fe entre 0.44 y 51.45%.

El coeficiente de correlación entre susceptibilidad magnética y la concentración de Fe es alto ($r=0.7315$), esto indica que al introducir el valor de la susceptibilidad magnética de una muestra a la ecuación que se muestra en el gráfico, se obtiene la concentración de Fe con una aproximación del orden del 30%.

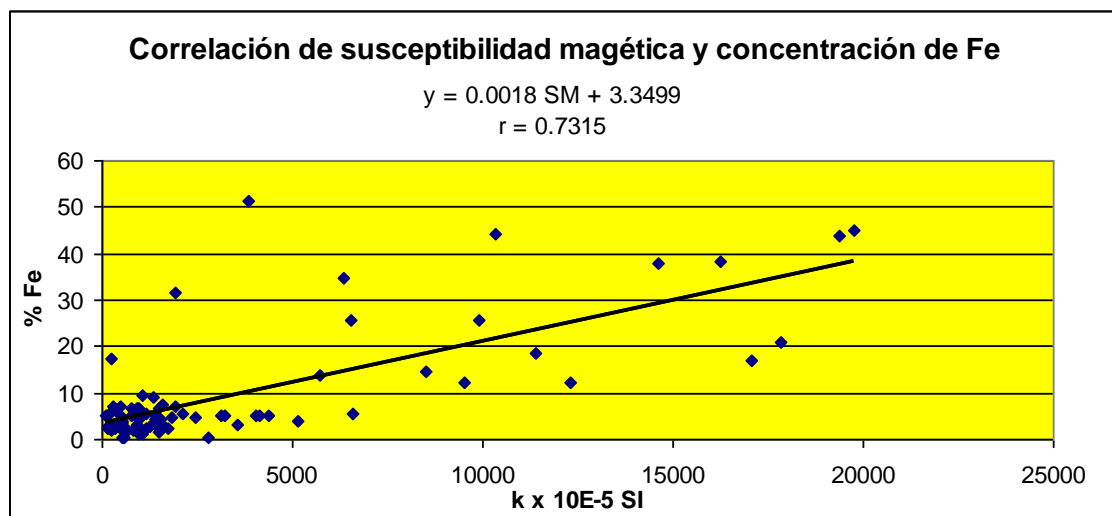


Figura 4.1 Correlación entre valores de susceptibilidad magnética (SM) y concentración total de (Fe%), en el área de la mina Peña Colorada.

Se espera que en la zona sureste a Peña Colorada ésta misma correlación se cumpla debido a que los valores extremos de hierro son parecidos como se muestra en la figura.

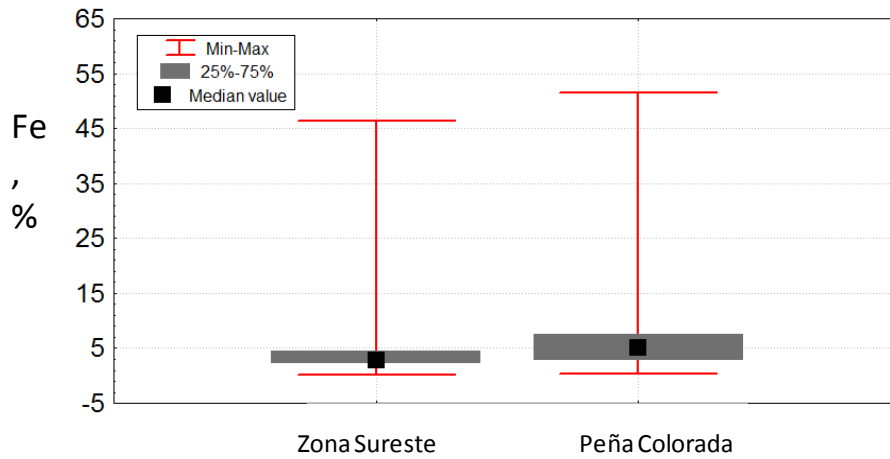


Figura 4.2 Comparación de valores de concentración de Fe% en ambas áreas
Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)

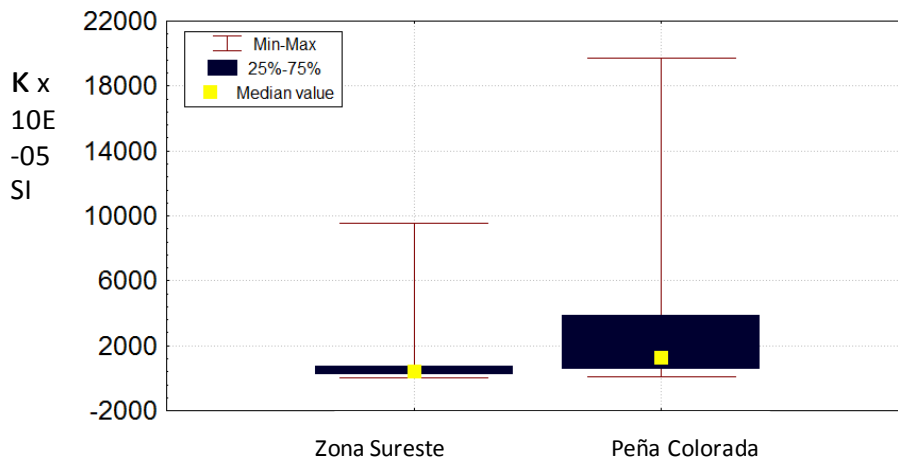


Figura 4.3 Comparación de valores de susceptibilidad magnética en ambas áreas
Fuente: Instituto de Geología, UNAM (2009)

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran la distribución de las muestras de mano en el área de Peña Colorada y se encuentran clasificados como bajo medio y alto que para ambos casos los bajos son los que se encuentran por abajo del valor promedio, los medios hasta dos veces el promedio y los altos arriba del doble del promedio.

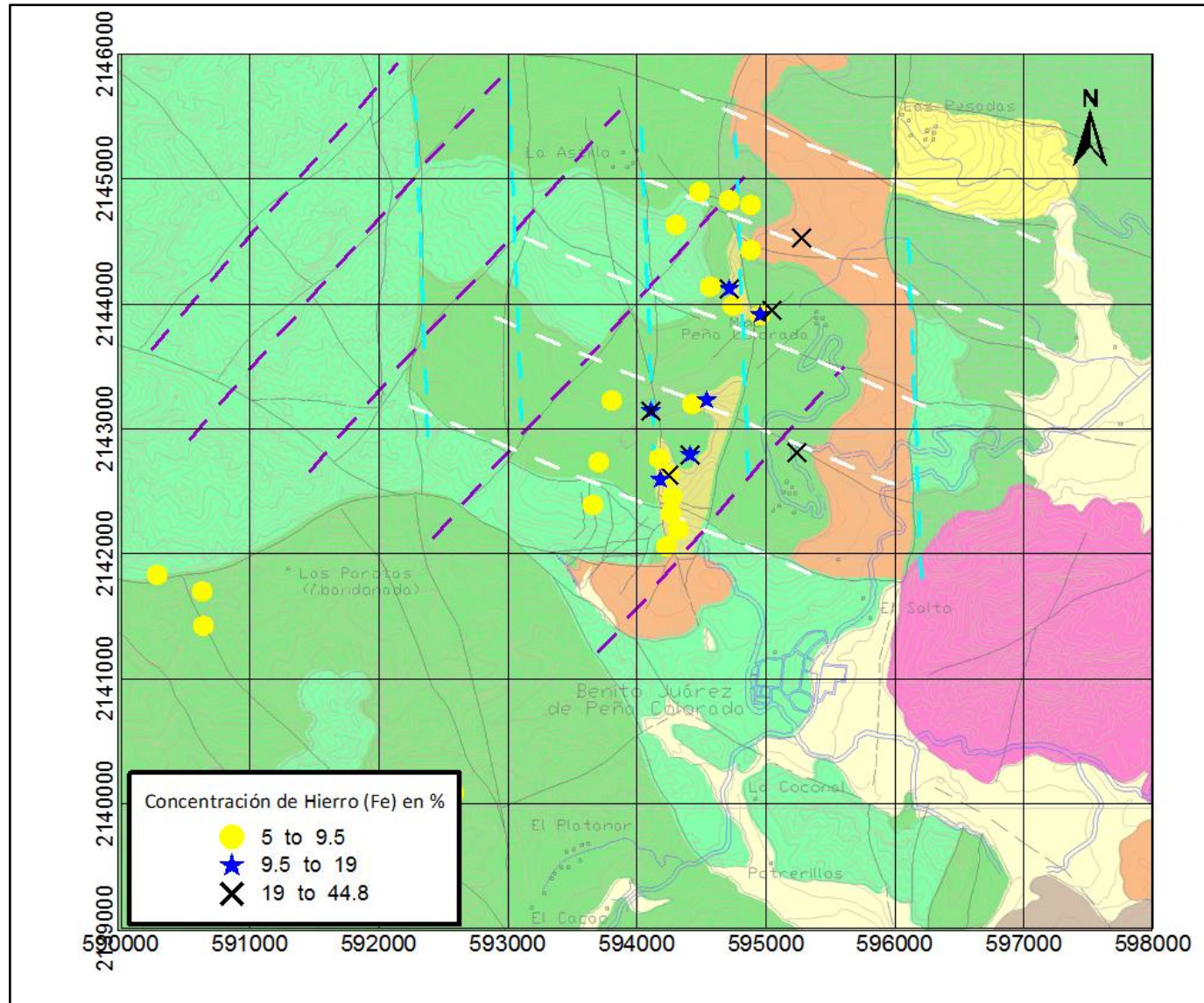


Figura 4.4 Mapa de Concentración de hierro por Fluorescencia de Rayos X en las muestras de mano en Peña Colorada

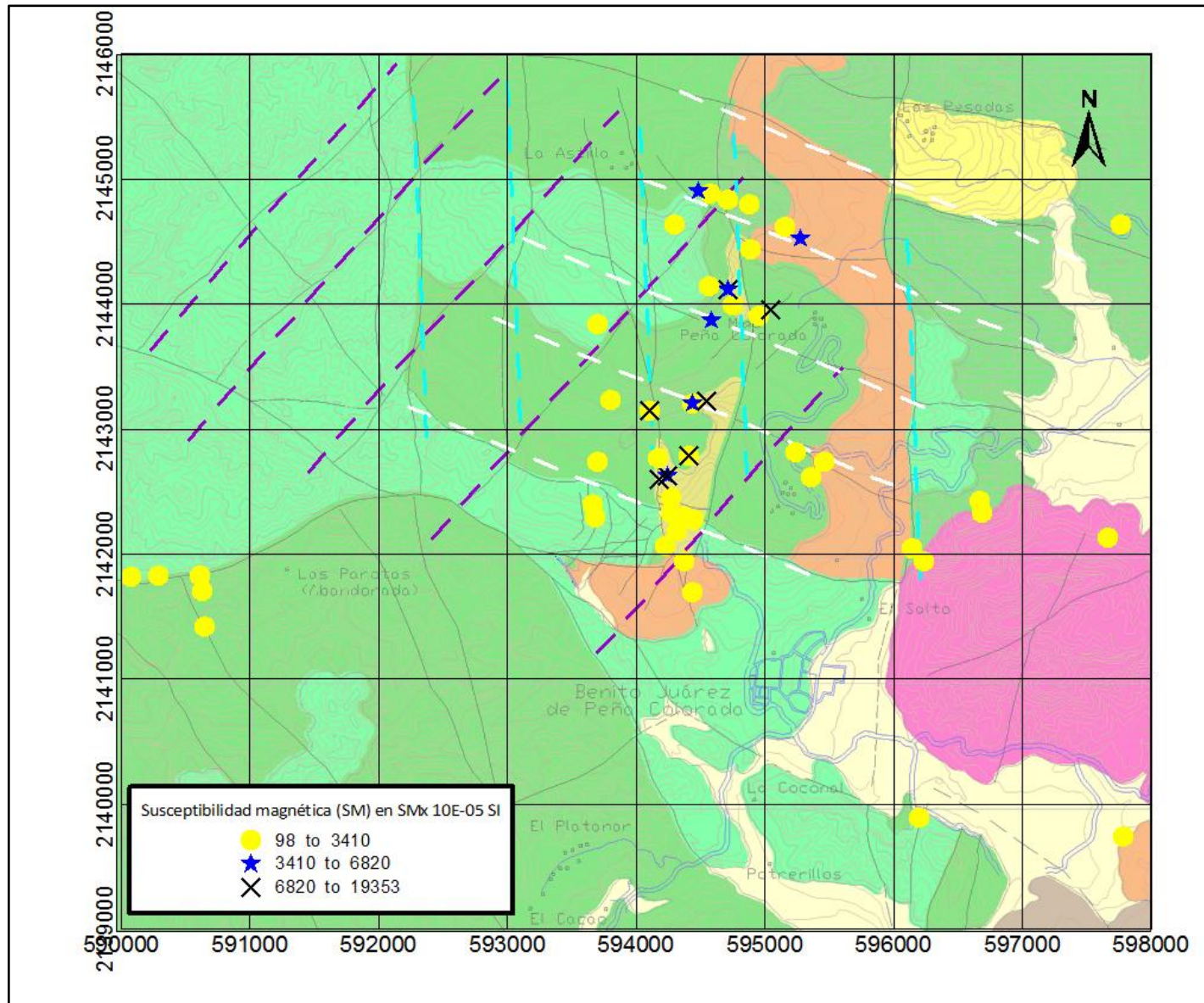


Figura 4.5 Mapa de Susceptibilidad magnética en muestras de mano en Peña Colorada

Las muestras que estuvieron por arriba del valor promedio de abundancia de hierro (9.5%) así como de susceptibilidad magnética (3410×10^{-5} SI) se seleccionaron para realizar análisis con mayor detalle, para lo cual se homogenizaron quebrándolas y moliéndolas y se les denomina en adelante muestras anómalas.

4.1.2 Muestras anómalas respecto al hierro

En Peña Colorada las muestras anómalas respecto al hierro son 23, de las cuales la mayoría están claramente controladas por las estructuras y se distribuyen con preferencia en la zona del tajo y entre la falla La Chula y El Chinforinazo como se observa en la figura 4.3 y 4.4.

La mayoría de las muestras con resultados representativos tanto de contenido de hierro como de susceptibilidad magnética se encuentran en la formación Tepalcatepec y en la propia brecha mineralizada, lo cual corrobora que la brecha es una mineralización con buenos contenidos de hierro.

Algunas muestras revelan mayor concentración de hierro que susceptibilidad magnética o viceversa, ello depende de la mineralogía de la roca, si contiene hierro magnético o dimagnético.

Al final de éste apartado se presentan los resultados de los análisis de difracción de rayos x en las muestras de mayores discrepancias entre contenido de hierro y susceptibilidad magnética, para determinar la naturaleza de ese comportamiento.

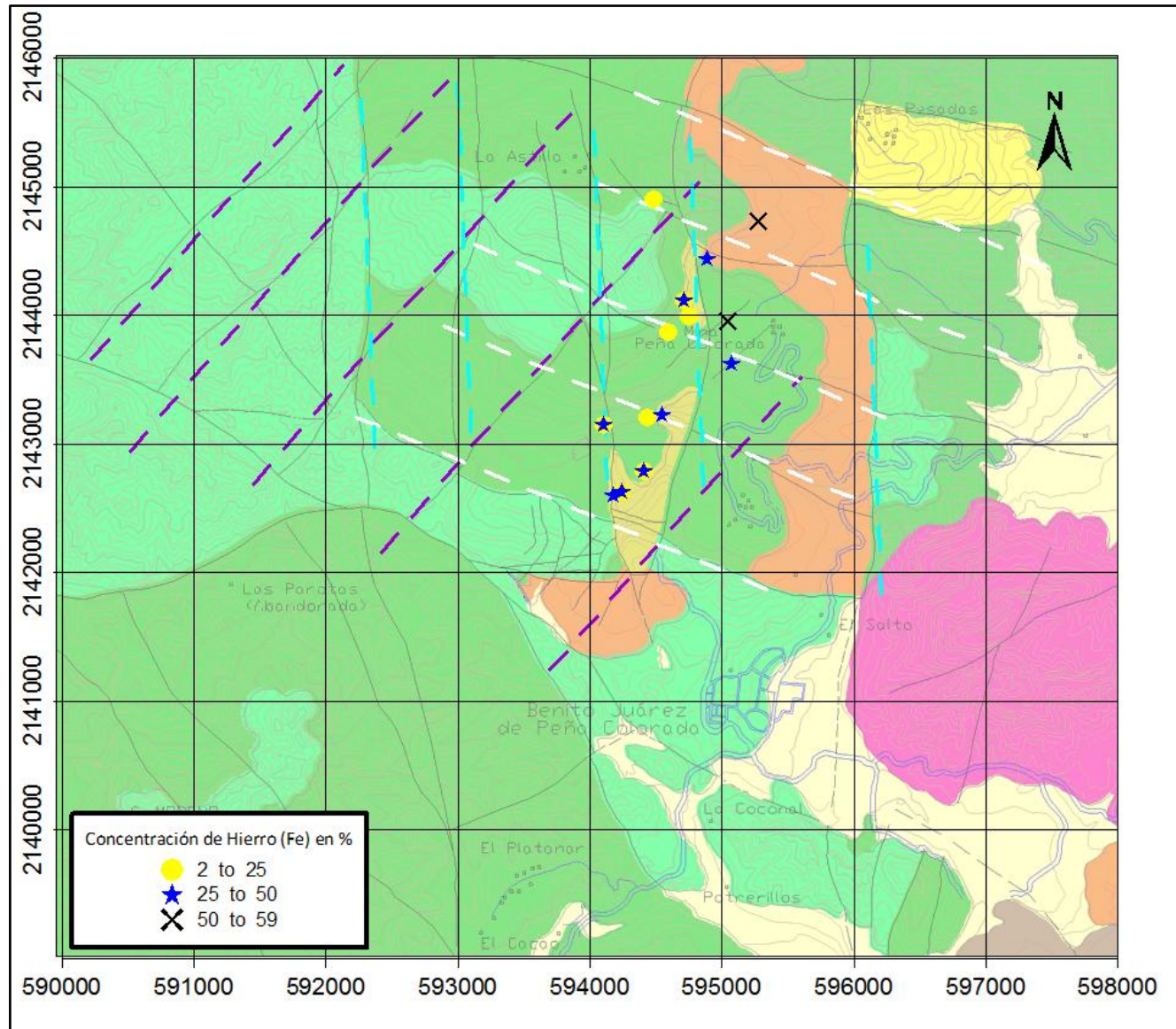


Figura 4.6 Mapa de Concentración de Hierro por Fluorescencia de Rayos X en muestras anómalas respecto al hierro en Peña Colorado

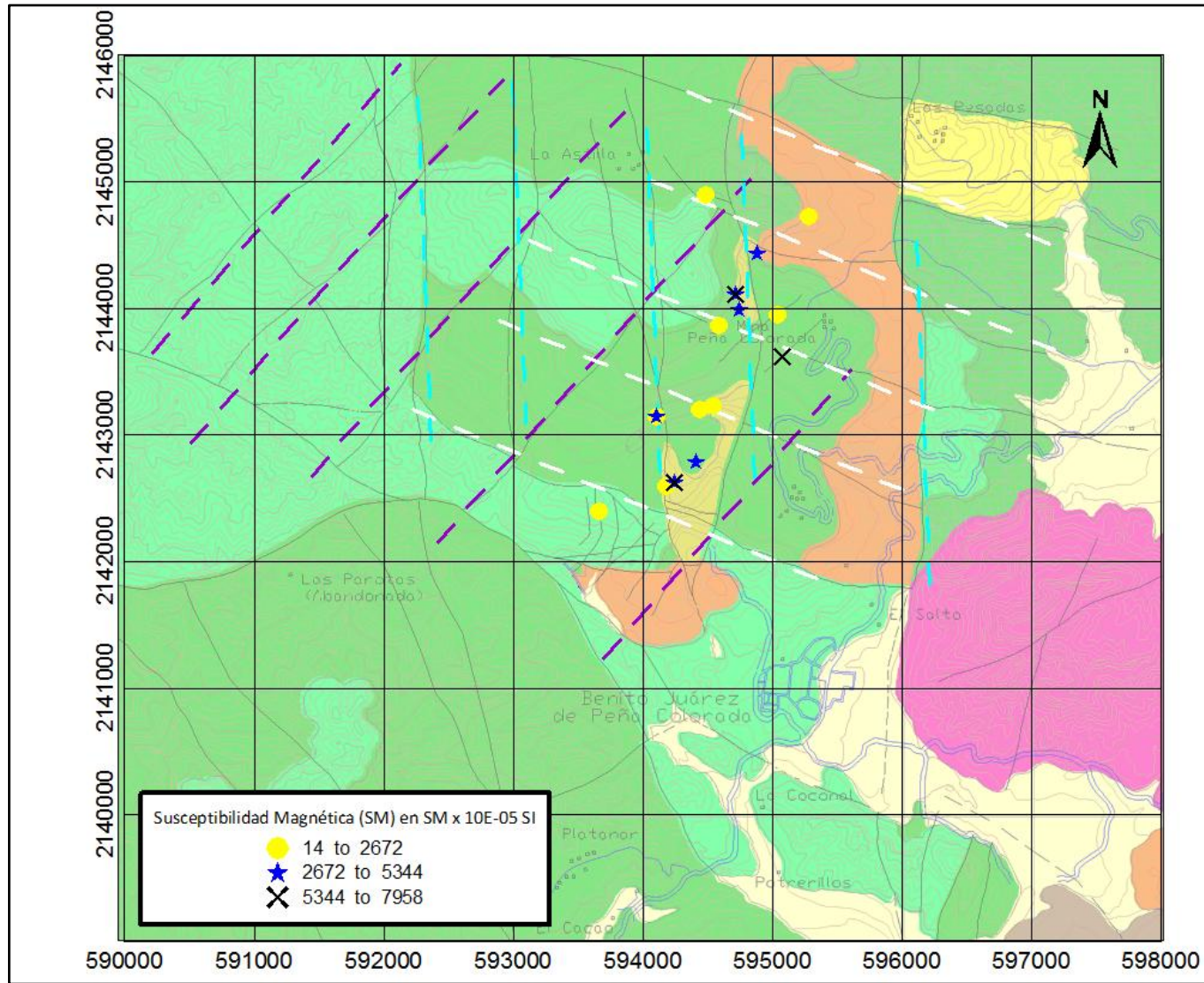


Figura 4.7 Mapa de Susceptibilidad Magnética en muestras anómalas respecto al hierro en Peña Colorada

En los siguientes mapas se identifica la abundancia de los elementos que fueron medidos con el dispositivo NITTON XLt3.

La clasificación de alta media y baja concentración se realizó utilizando la mediana, de ésta manera las que están por debajo de ella son bajas, las que están entre la mediana y dos veces la mediana son medias y por encima del doble de la mediana son altas:

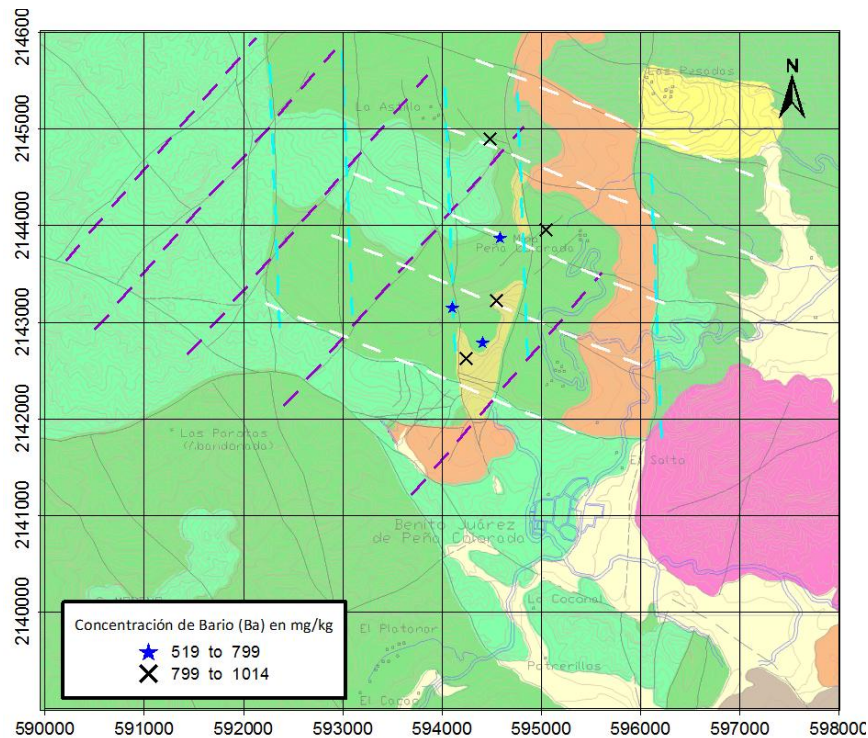
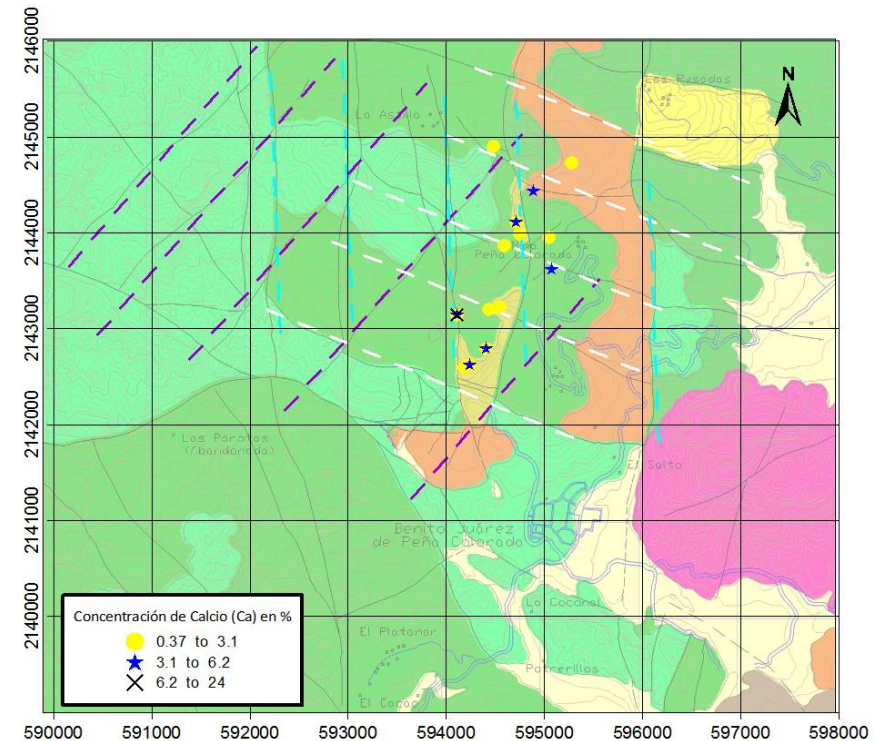


Figura 4.8 Concentración de Bario por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada



4.9 Concentración de Calcio por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

En ambas figuras las mayores abundancias se encuentran dentro del área de la mina y al sur de la misma, cercanas a la falla La Chula. La mineralización de ambos minerales se encuentra controlada por las fallas y la retícula que forman éstas.

Algunas muestras parecieran estar alineadas a los rasgos NW-SE y algunas otras a las N-S sin embargo se observa que las fallas NW-SE, NE-SW y N-S forman bloques dentro de los cuales se localiza la mineralización incluso el actual tajo de la mina se encuentra dentro de uno de éstos bloques.

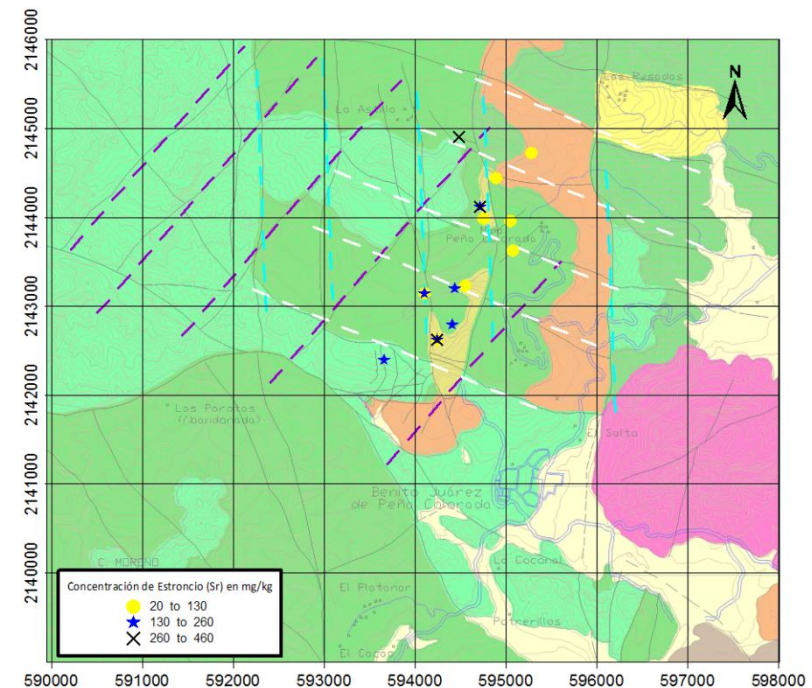
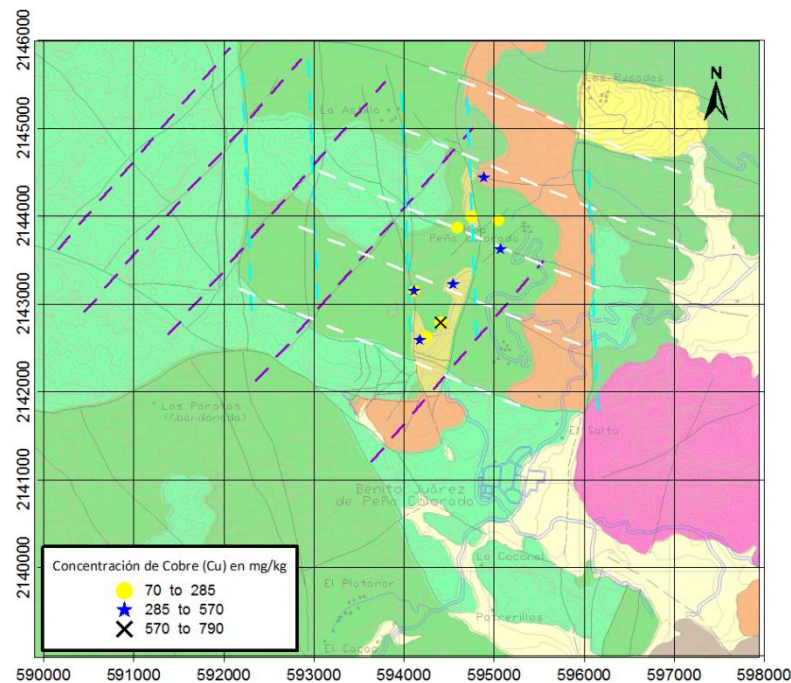


Figura 4.10 Concentración de Cobre por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada Figura 4.11 Concentración Estroncio por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

El comportamiento del Cobre y el Estroncio es muy similar al del Bario y Calcio ya que la principal mineralización se encuentra dentro de los bloques identificados como el resultado del fallamiento en las tres direcciones mencionadas anteriormente.

Nuevamente la litología que controla las altas concentraciones de los elementos son en primer lugar la brecha que es la mineralización en sí y la formación Tepalcatec en donde se emplaza la mineralización de actitud tabular.

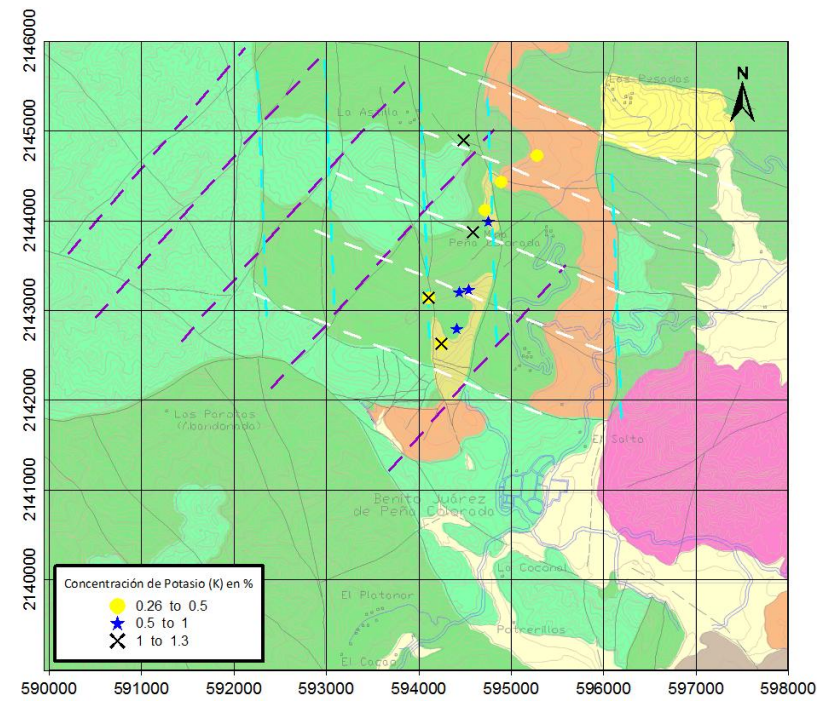
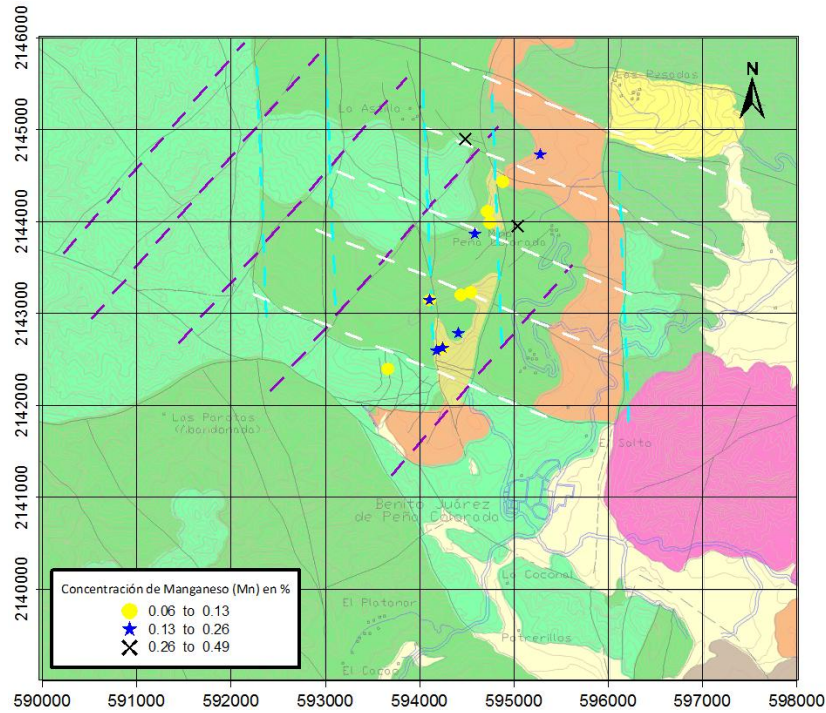


Figura 4.12 Concentración de Manganeseo por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada Figura 4.13 Concentración de Potasio por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

La concentración de manganeso es en general media baja y la de potasio media alta, ambas concentraciones están asociadas a la brecha mineralizada que al estar formada por fragmentos de andesita, granodiorita, aplita y magnetita masiva textura gruesa y una matriz de magnetita y pirita de grano fino permite ésta anomalía en la concentración de manganeso respecto al resto de la litología.

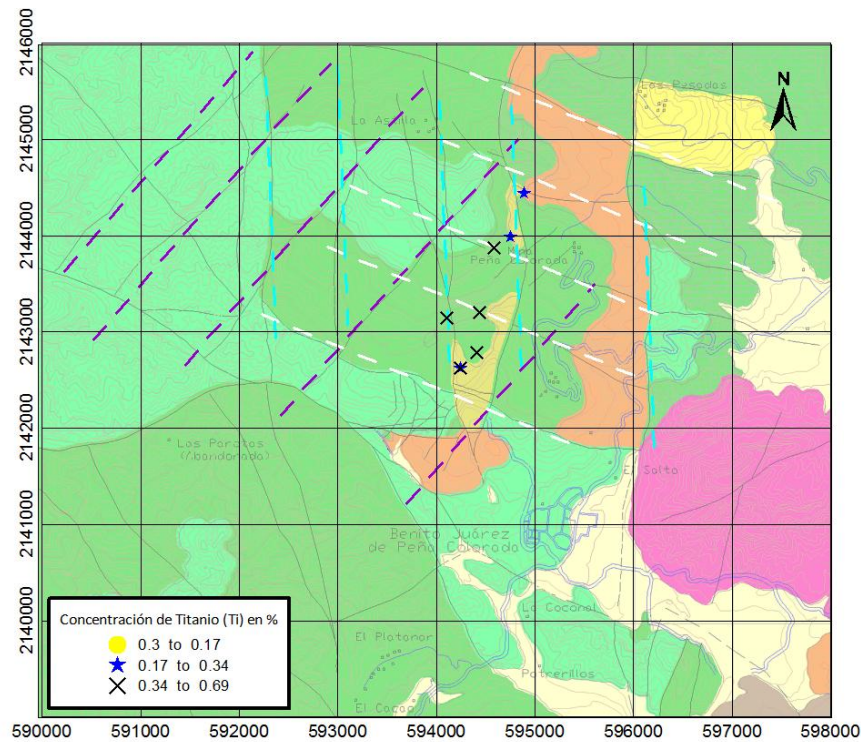


Figura 4.14 Concentración de Titanio por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

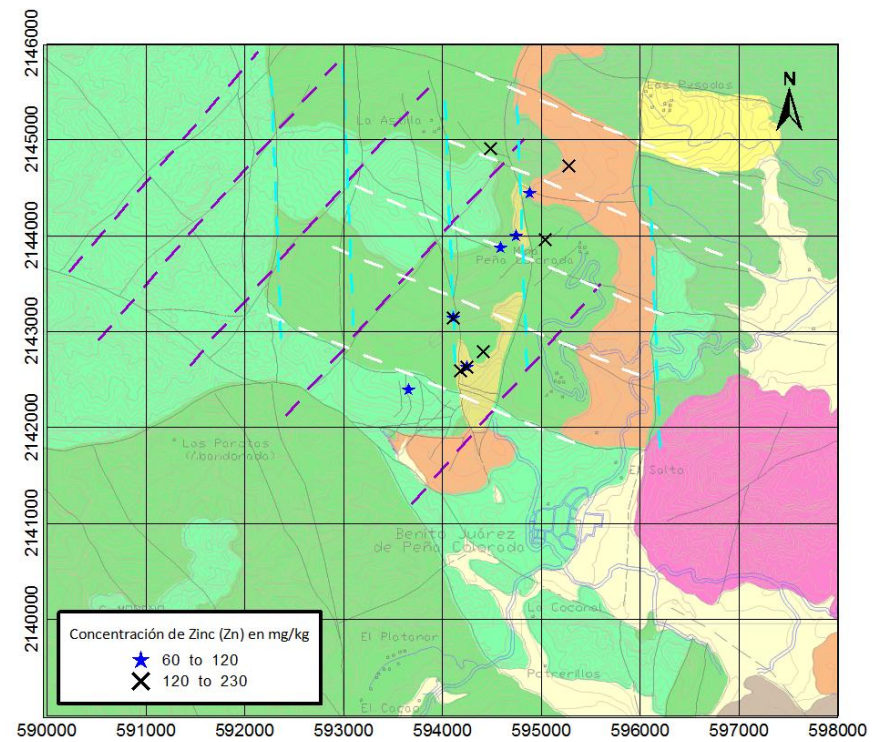


Figura 4.15 Concentración de Zinc por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

La concentración de titanio y zinc es en general alta y se encuentra asociada a la formación Tepalcatepec y en segundo lugar a la brecha mineralizada específicamente en el bloque que forman los límites de la falla la chula y el chinforinazo para el caso de titanio y para el zinc se observan 2 principales concentraciones, una entre la falla la chula y el chinforinazo y la otra en el borde nor-noreste de la falla el águila (el tajo).

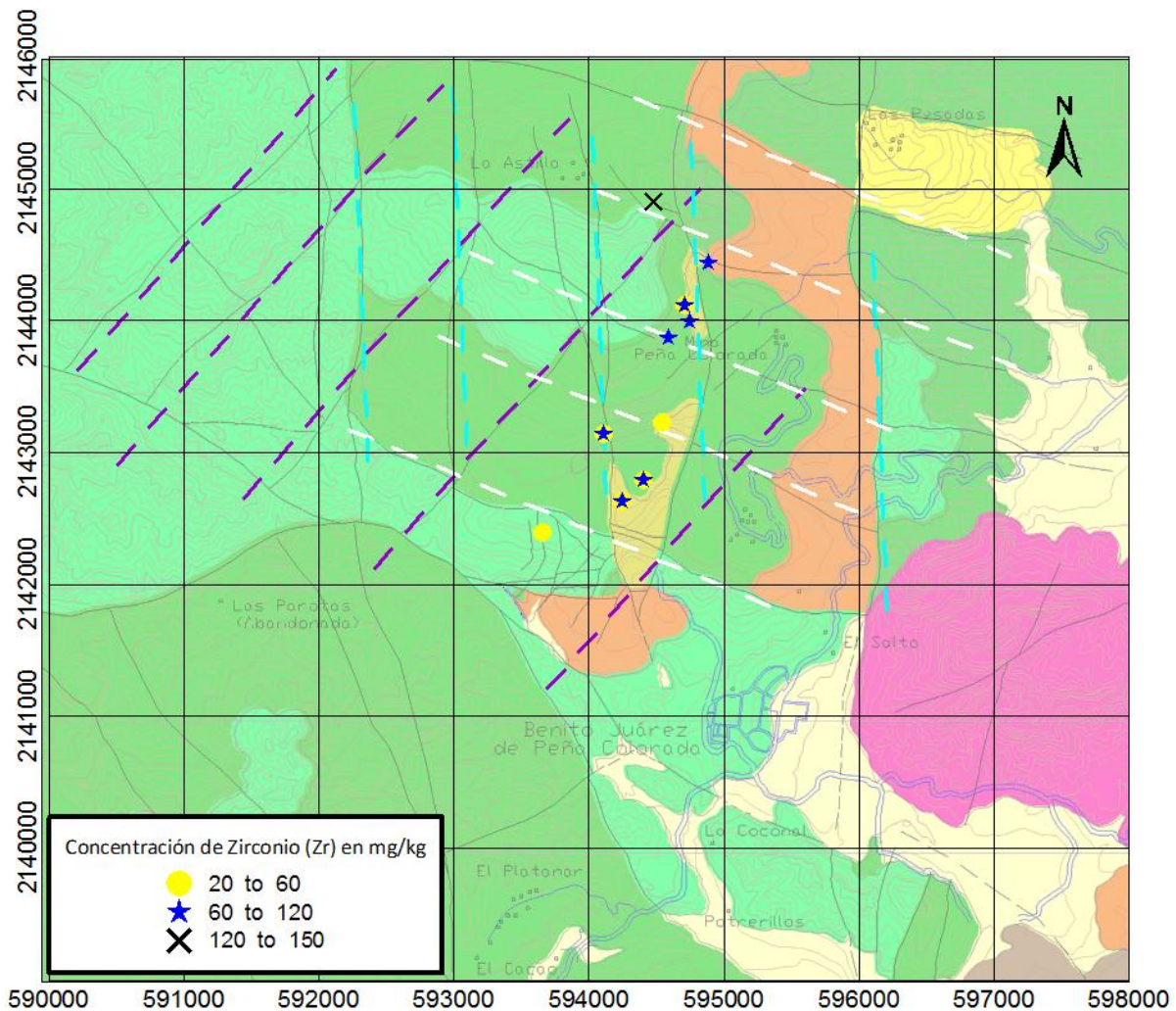


Figura 4.16 Concentración de Zirconio por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

Para el caso del zirconio que se encuentra en concentraciones medias, las principales muestras se encuentran en el área del tajo que corresponde al borde nor-noreste de la falla el águila.

La difracción de rayos x se realizó a las muestras que tenían las mayores discrepancias entre las altas y bajas concentraciones de Fe y susceptibilidades magnéticas.

La PC 134a tiene alta concentración de hierro y relativamente baja susceptibilidad magnética lo cual se atribuye a que dentro de su mineralogía se tiene pirita, clorita y vermiculita que son minerales que contienen hierro pero no magnético por tanto incrementa la concentración de dicho elemento siendo en éste caso la magnetita el único mineral dentro de ésta roca la que ocasiona la susceptibilidad magnética.

La muestra 86e fue tomada en la zona del tajo y tiene concentración y susceptibilidad magnética alta debido a su composición mineralógica en la que se incluyen los minerales magnetita y goetita como dos de los tres minerales formadores de esa roca, mismos que contienen hierro magnético. Así que la mayoría del hierro es magnético.

La muestra 92b tiene baja concentración y baja susceptibilidad magnética y como se observa en la mineralogía contiene pocos minerales que en su composición tienen hierro y de en esos minerales está la magnetita que casi en su totalidad es hierro magnético.

Figura 4.17 Tabla de Difracción de Rayos x

Clave	Fe%	SM	Mineralogía
PC 134a	44.04	10315	Magnetita Fe_3O_4
			Pirita FeS_2
			Clorita $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
			Vermiculita $(\text{MgFe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
PC 86 e	44.85	19744	Magnetita Fe_3O_4
			Hematita Fe_2O_3
			Goetita $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$
PC 92 b	13.65	5713	Plagioclasa $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$
			Augita $\text{Ca}(\text{FeMg})\text{Si}_2\text{O}_6$
			Cuarzo SiO_2
			Calcita CaCO_3
			Magnetita Fe_3O_4

De este análisis se concluye que al aumentar la susceptibilidad magnética aumenta el contenido de minerales de mena para el aprovechamiento del hierro

Figura 4.18 Tabla completa de muestras con valores superiores respecto al hierro (anómalas) por Fluorescencia de Rayos X en Peña Colorada

No	Clave	x	y	Ba	Zr	Sr	Zn	Cu	Fe	Mn	Ti	Ca	K	χ 10E-08 m ³ /kg
				mg/kg					%					
1	PC 90	595042	2143954	832	BLD	20	150	240	51.61	0.27	BLD	2.53	BLD	1934
2	PC 154b	594481	2144902	1013	120	380	200	BLD	6.35	0.26	0.69	2.99	1.27	1426
3	PC 139	594433	2143202	BLD	150	130	BLD	BLD	5.09	0.07	0.5	0.65	0.99	1507
4	PC 91 a	594587	2143869	519	100	460	90	70	5.66	0.14	0.57	3.07	1.27	1034
5	PC 135 b	594106	2143145	519	70	200	60	BLD	3	0.09	0.59	5.9	1.25	14
6	PC 92 b	594713	2144117	BLD	60	220	BLD	BLD	9.98	0.1	0.04	5.8	0.3	6294
7	PC 112	594713	2144117	BLD	40	260	BLD	790	43.61	0.06	0.06	1.53	BLD	4533
8	PC 134	594407	2142790	BLD	50	BLD	120	570	43.23	0.25	0.11	2.1	BLD	5166
9	PC 36b	594242	2142627	BLD	90	300	140	130	13.83	0.21	0.41	5.36	0.27	7958
10	PC 134c	594106	2143145	BLD	50	BLD	210	130	22.73	0.49	0.1	6.31	BLD	2958
11	PC 36a	594242	2142627	799	50	200	110	BLD	23.64	0.13	0.17	2.62	1.24	5496
12	PC 36c	594242	2142627	BLD	70	50	BLD	220	28.68	0.1	0.33	4.36	0.26	4619
13	PC 134a	594179	2142594	BLD	BLD	BLD	120	350	46.36	0.19	0.03	1.19	BLD	718
14	PC 114e	594885	2144437	BLD	60	60	90	380	29.04	0.09	0.27	3.47	0.3	3698
15	PC 136	594106	2143145	BLD	50	80	60	BLD	24.53	0.11	0.11	5.1	0.31	810
16	PC 89 a	595075	2143623	BLD	BLD	100	BLD	540	41.39	BLD	BLD	3.38	BLD	5464
17	PC 134 f	594106	2143145	BLD	20	40	140	330	41.25	0.13	0.05	3.07	0.43	603
18	PC 115	594407	2142790	651	60	250	120	100	21.57	0.13	0.34	4.73	0.75	2672
19	PC 92 a	594747	2143991	BLD	90	100	80	200	20.61	0.12	0.2	2.73	0.51	4116
20	PC 114b	595278	2144726	BLD	BLD	30	120	BLD	50.02	0.18	BLD	3	0.3	1251
21	PC 86 e	59467	2142868	BLD	BLD	BLD	230	BLD	58.64	0.06	BLD	0.37	BLD	4361
22	PC 86 d	593658	2142396	BLD	30	180	70	BLD	1.97	0.12	0.06	24.04	BLD	14
23	PC 144	594543	2143227	816	40	50	BLD	410	34.01	0.07	0.07	2.58	0.71	2209
Mínimo				BLD	BLD	BLD	BLD	BLD	1.97	BLD	BLD	0.37	0	14
Máximo				1013	150	460	230	790	58.64	0.49	0.69	24.04	1.27	7958
Promedio				271	52	135	92	194	27.25	0.15	0.2	4.21	0.44	2994
Desv. Est.				379	40	130	71	225	17.38	0.1	0.22	4.63	0.47	2216

4.2 Zona Sureste

4.2.1 Muestras de mano

Se realiza el mismo procedimiento para las muestras de la zona sureste para verificar que la correlación en Peña Colorada (0.73) es del orden de la de la zona sureste.

Para éste caso la susceptibilidad magnética que resultó de los análisis a las muestras de mano en la zona sureste de Peña Colorada varían de 19 a 7623 x 10⁻⁵ SI y la concentración de Fe de 3.8 a 47.6 %.

El coeficiente de correlación entre la susceptibilidad magnética y la concentración total de Fe es igual a 0.68.

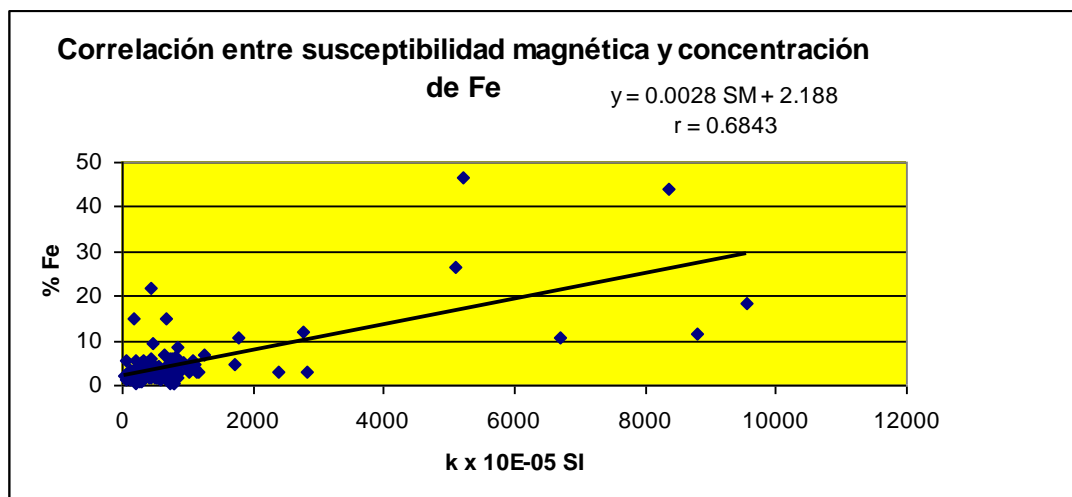


Figura 4.19 Correlación entre susceptibilidad magnética (SM) y concentración total de (Fe%), en el área de la mina Peña Colorada

Que para fines prácticos redondeando las cifras ambas correlaciones son de 0.71

De igual forma, las muestras que estuvieron por arriba del promedio de abundancia de hierro (4.6%) así como de susceptibilidad magnética (877 x 10⁻⁵ SI) se seleccionaron para realizar un análisis más específico, se homogenizaron quebrándolas y moliéndolas.

En las figuras 4.20 y 4.21 se localizan las muestras con clasificación de alta media y baja tanto para la concentración de Fe como para la susceptibilidad magnética en la zona sureste

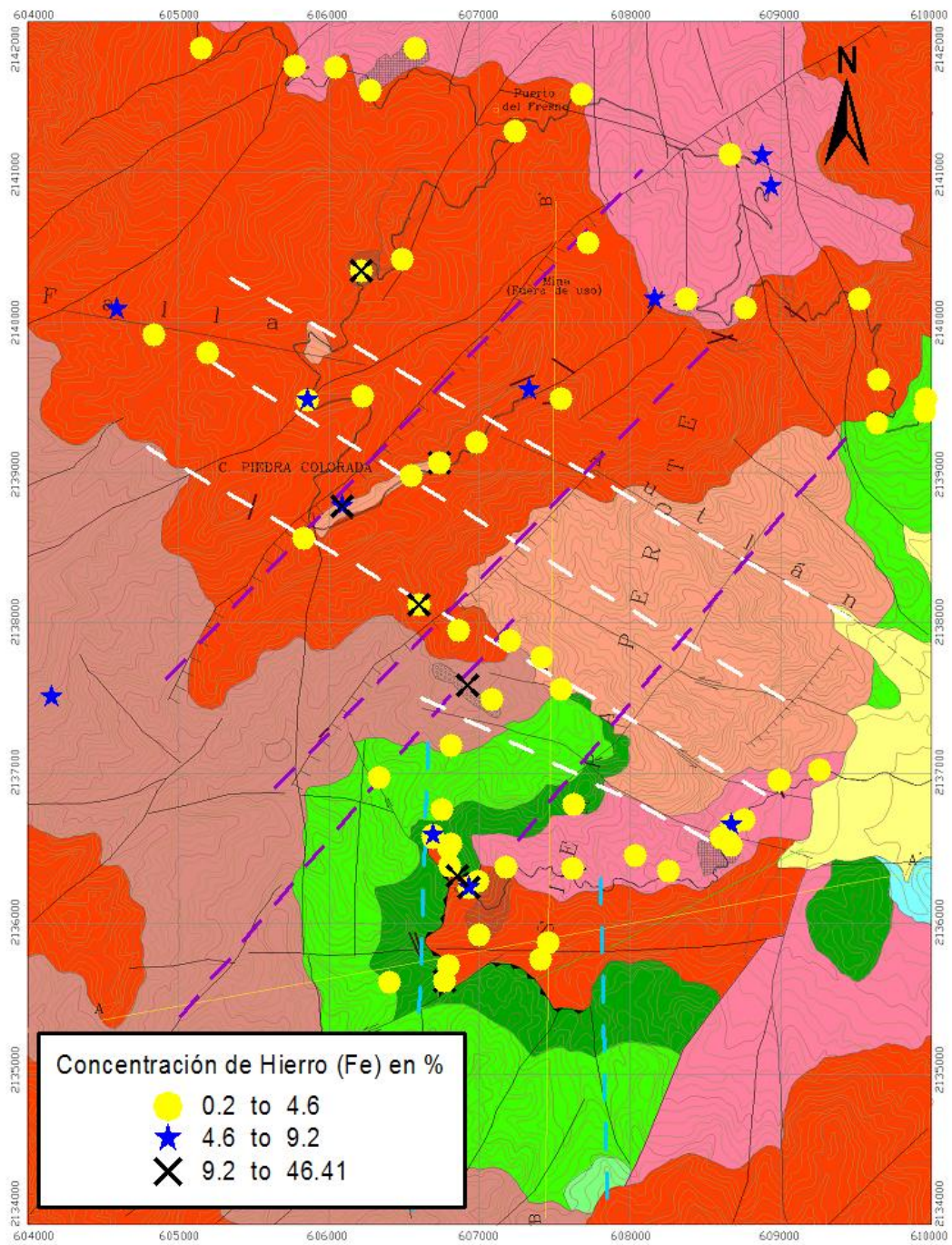


Figura 4.20 Mapa de Concentración de Hierro por Fluorescencia de Rayos X en la Zona Sureste

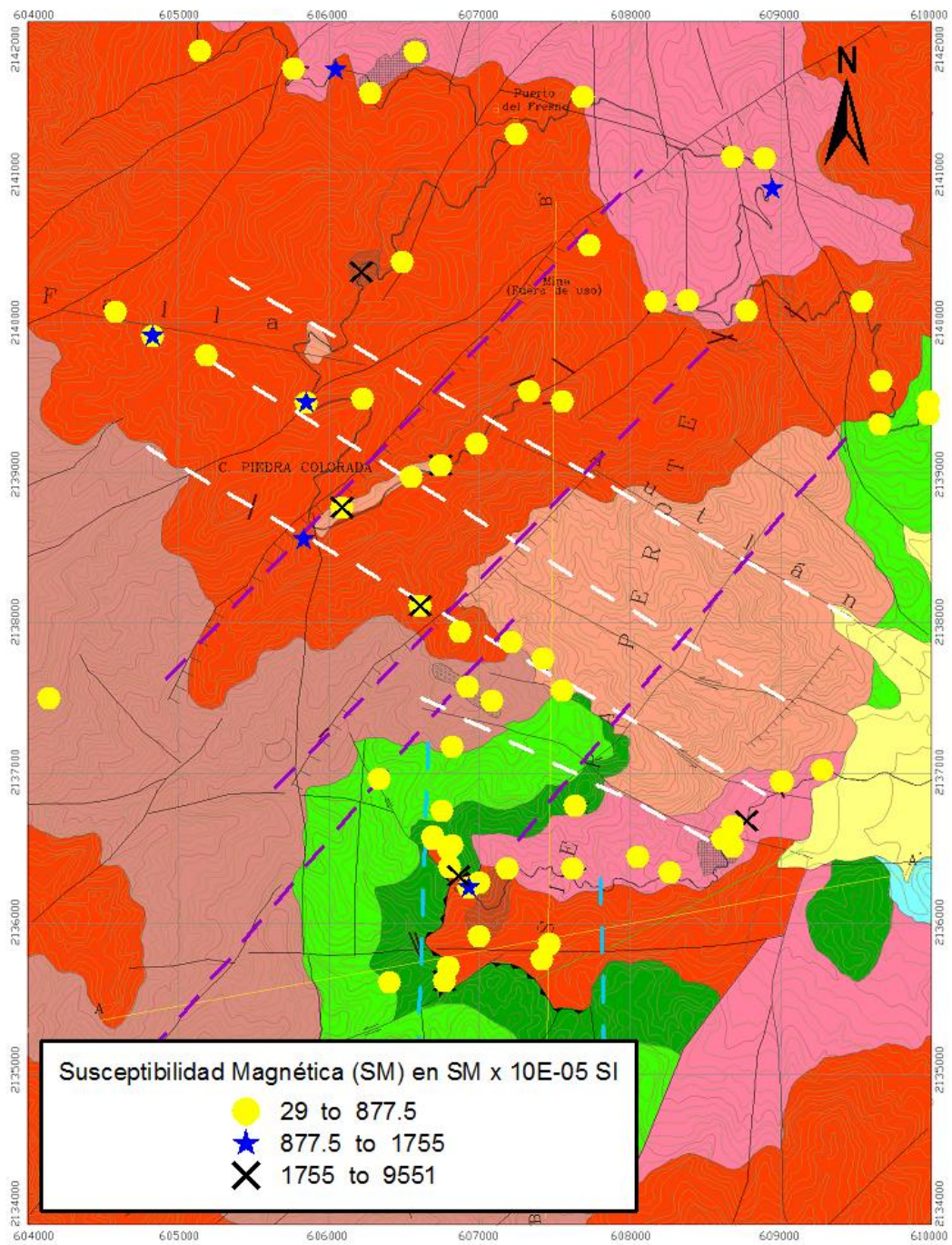


Figura 4.21 Mapa de Susceptibilidad Magnética en el área sureste

4.2.2 Muestras anómalas respecto al hierro

El resultado de los análisis con los 9 elementos detectados por la técnica de análisis así como la susceptibilidad magnética a las 23 muestras homogeneizadas se presenta en la tabla 4.34 en donde destacan los elementos Ca y Fe como los elementos con mayor abundancia, y los que se leen como BLD son los que están por debajo del límite de detección.

Los elementos que no fueron detectados por la técnica de análisis en ninguna de las muestras anómalas se descartaron de la tabla y éstos fueron: Antimonio (Sb), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Rubidio (Rb), Plata (Ag) y Estaño (Sn).

Se muestran primero los mapas con las muestras anómalas para hierro y susceptibilidad magnética con las figuras 4.22 y 4.23.

Para el caso de la figura 4.22 la concentración de hierro se localiza principalmente en el centro y sur del área. En el sur se puede localizar uno de los bloques limitados por fallas como los de Peña Colorada, dentro del mismo se encuentran valores altos y medios.

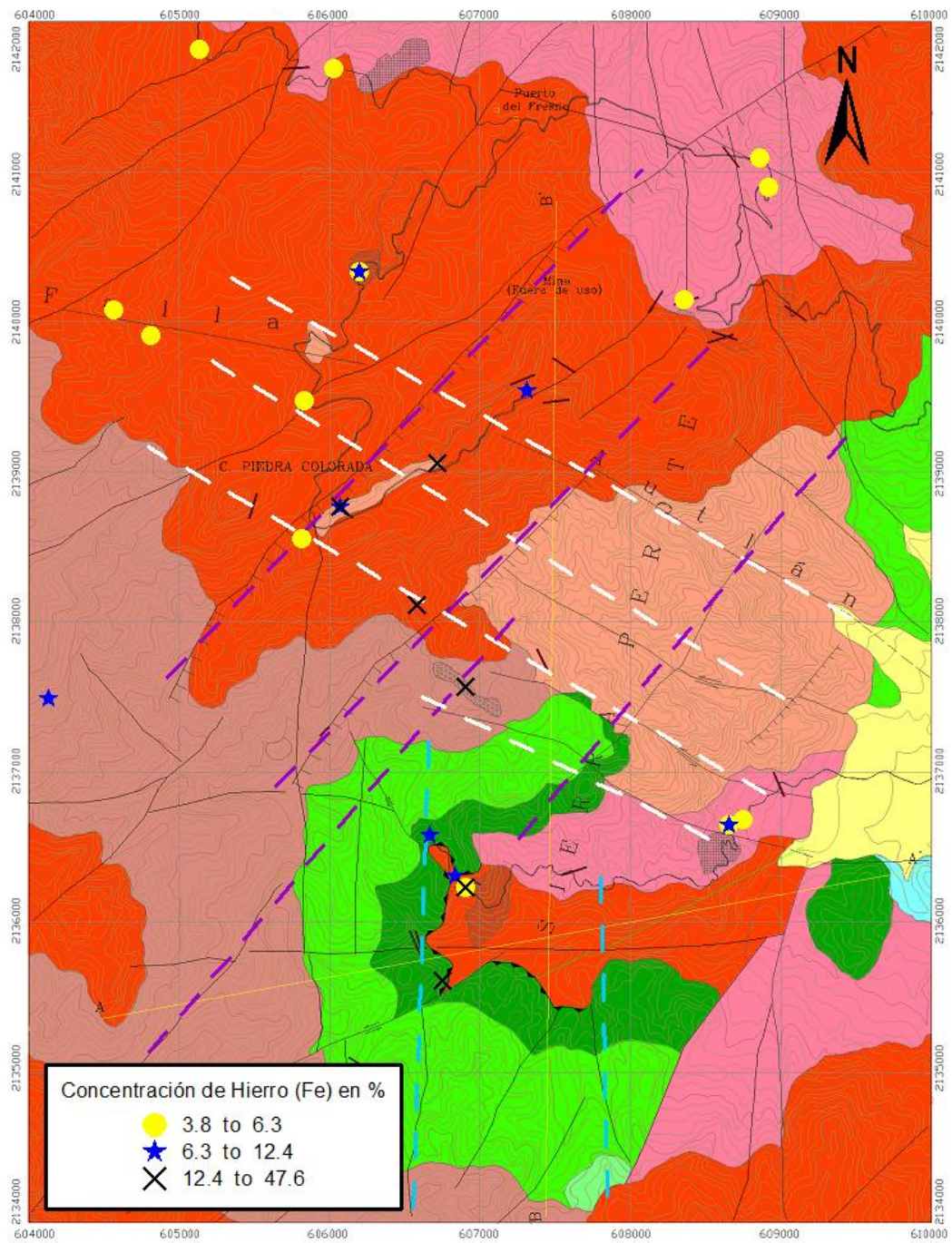


Figura 4.22 Concentración de hierro en muestras anómalas respecto al hierro por Fluorescencia de Rayos X en la zona sureste

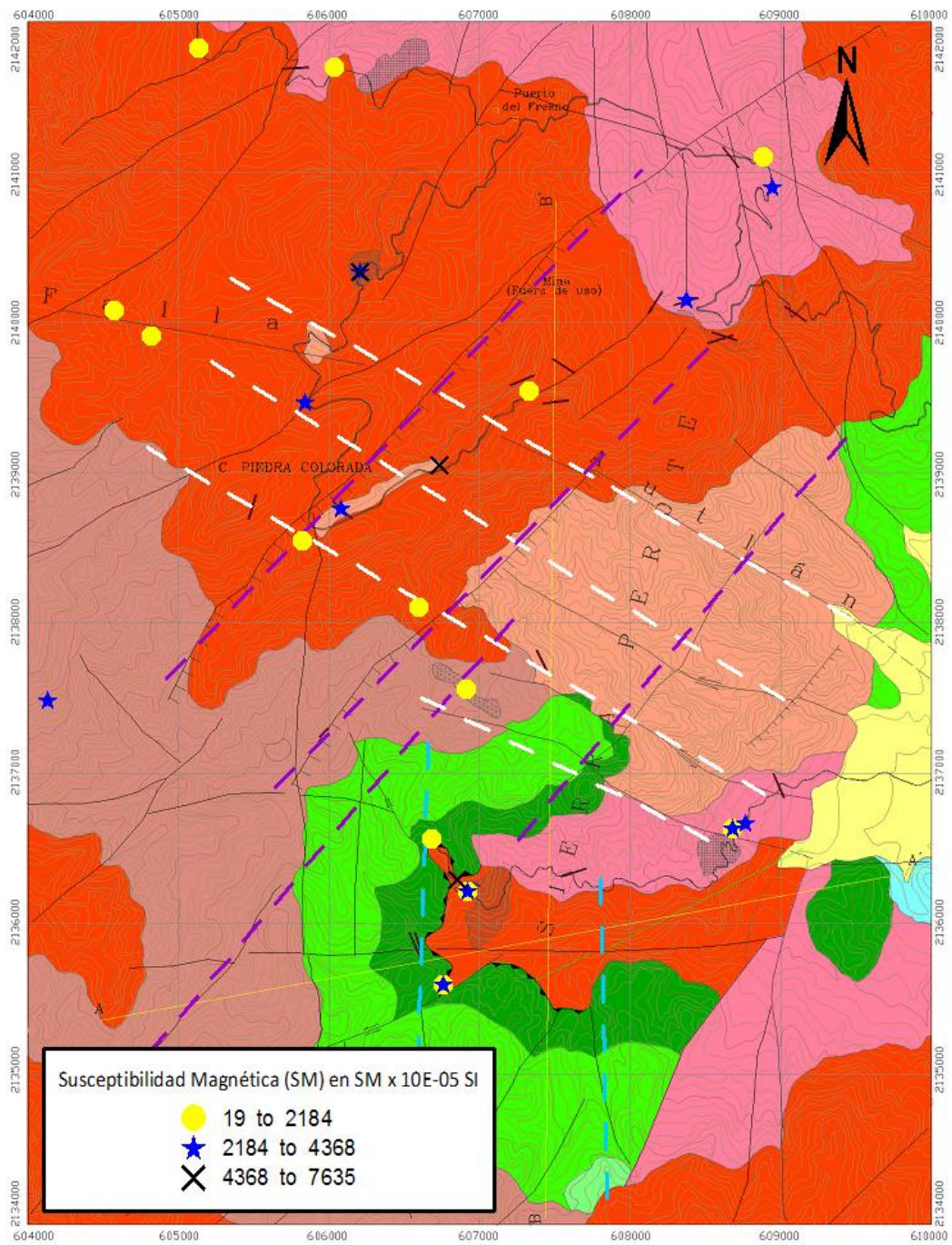


Figura 4.23 Susceptibilidad Magnética en muestras anómalas respecto al hierro en la zona sureste

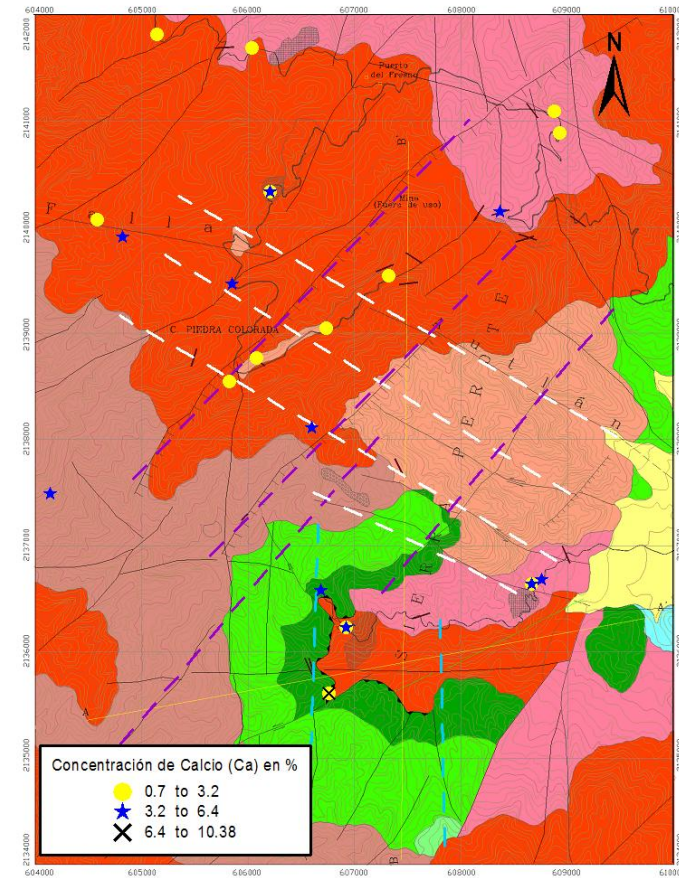
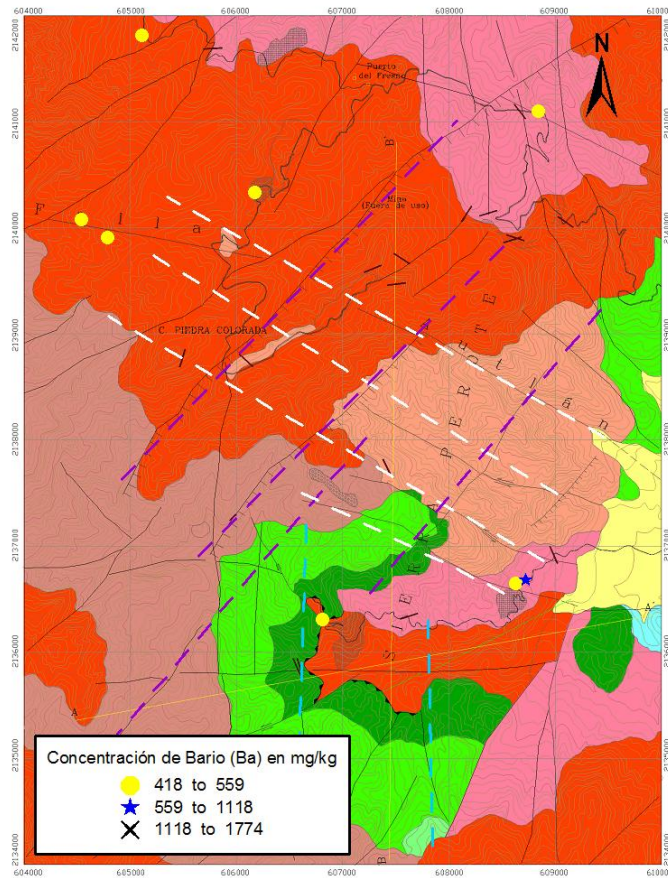


Figura 4.24 Concentración de Bario por Fluorescencia de Rayos X en la zona sureste Figura 4.25 Concentración Calcio por Fluorescencia de Rayos X en la zona sureste

La concentración de ambos elementos es media baja y la principal concentración de Calcio se encuentra en el bloque controlado por las estructuras geológicas que se localiza al sur del área

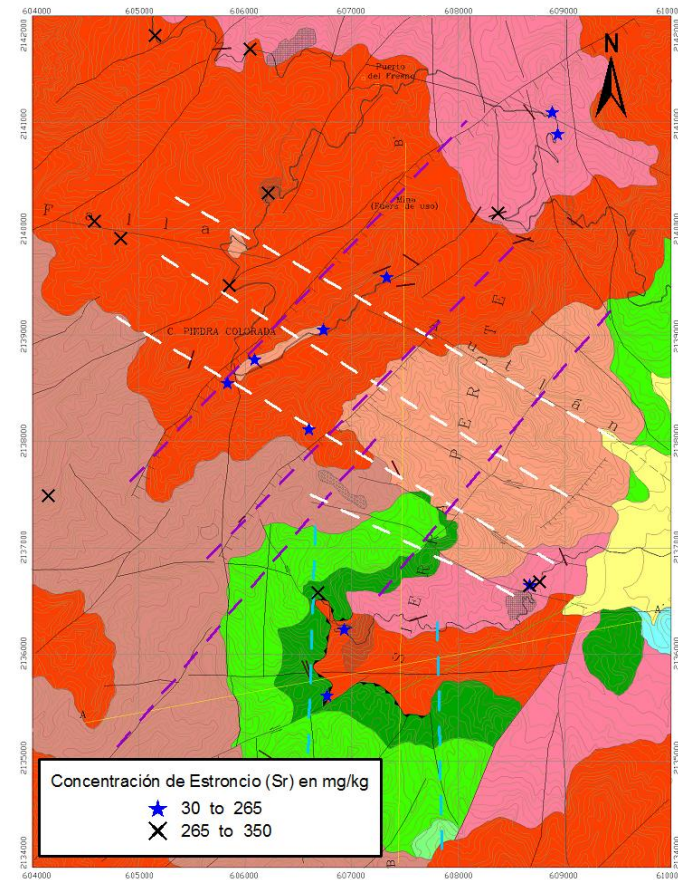
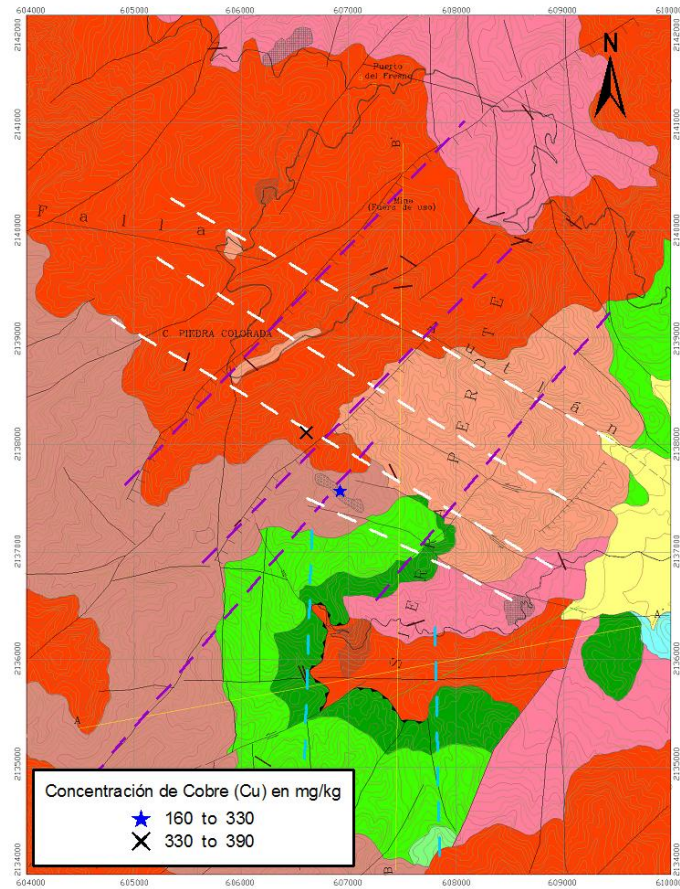


Figura 4.26 Concentración de cobre por Fluorescencia de Rayos X en la zona sureste Figura 4.27 Concentración estroncio por Fluorescencia de Rayos X en la zona sureste

La concentración del el cobre y el estroncio en la zona sureste se asocia a las fallas NW-SE y NE-SE cabe señalar que no hay concentración en el bloque hacia el sur.

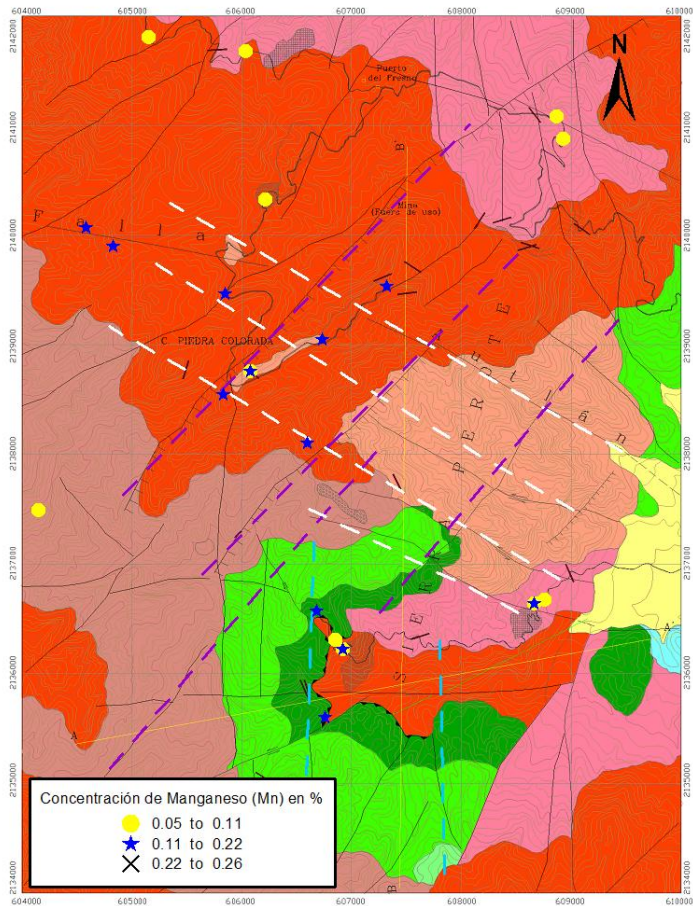


Figura 4.28 Concentración de Manganeseo por Fluorescencia de Rayos X en zona sureste

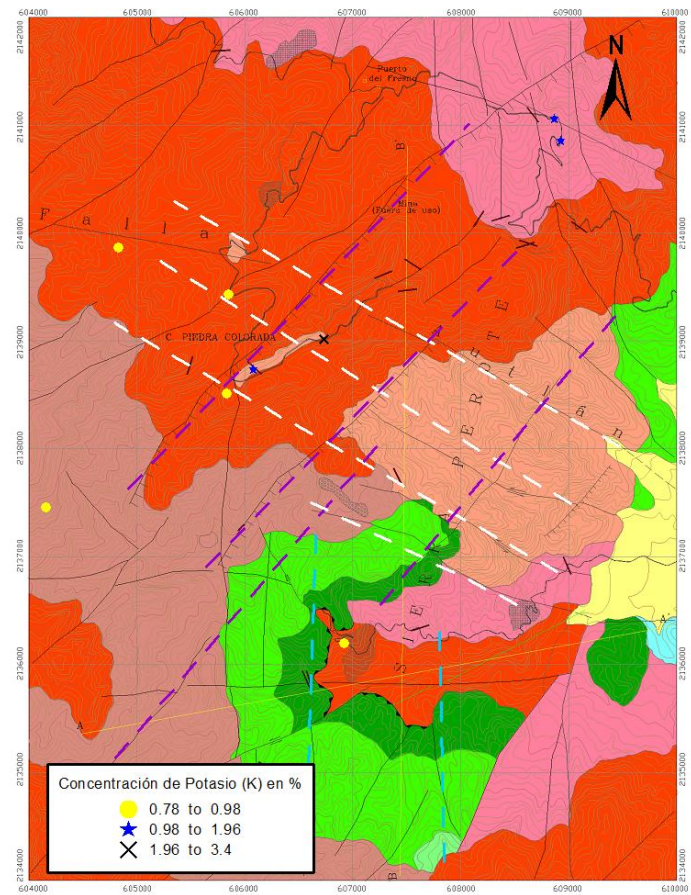


Figura 4.29 Concentración de Potasio por Fluorescencia de Rayos X en zona sureste

La concentración de manganeso es mayor que la concentración de potasio. La concentración del manganeso se puede asociar a las fallas NW-SE y el bloque sur presenta concentraciones medias bajas. El potasio únicamente se asocia a las fallas NW-SE.

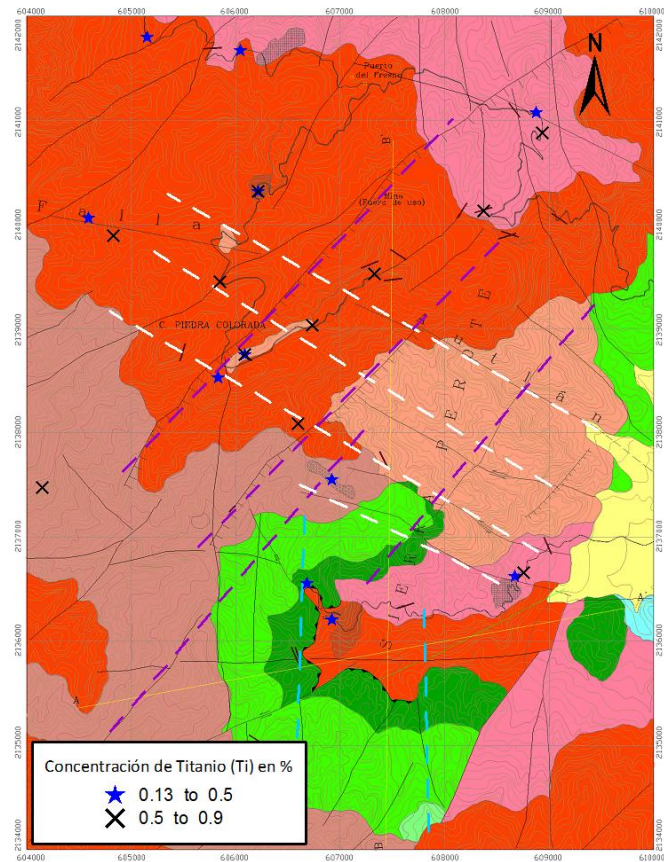


Figura 4.30 Concentración de Titanio por Fluorescencia de Rayos X en zona sureste

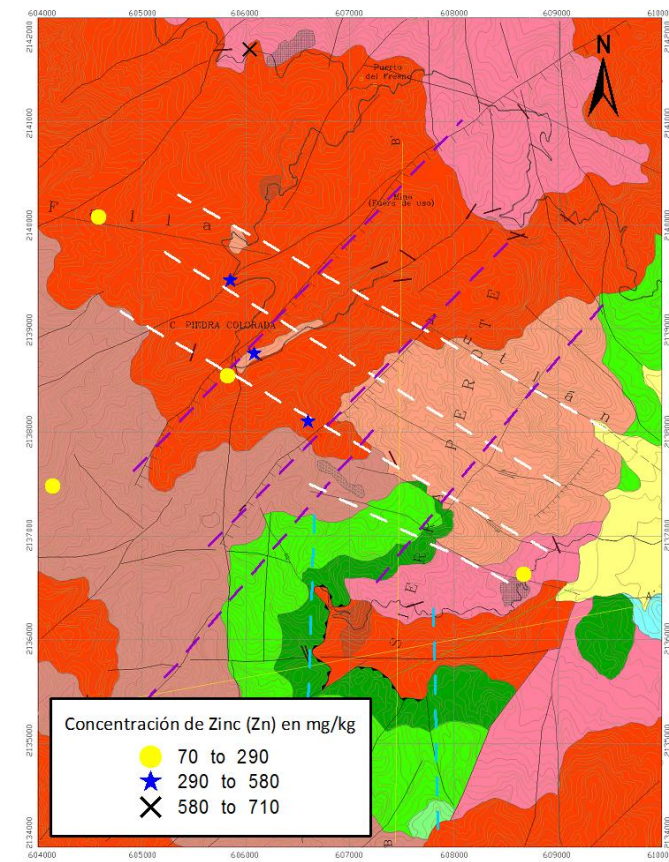


Figura 4.31 Concentración de Zinc por Fluorescencia de Rayos X en zona sureste

El titanio es claramente más abundante que el zinc en la zona. Y ambos elementos se pueden asociar a las fallas NW-SE y NE-SW con ausencia casi total de concentración en el bloque sur. La distribución de ambos elementos se desarrolla principalmente en el intrusivo granodiorítico.

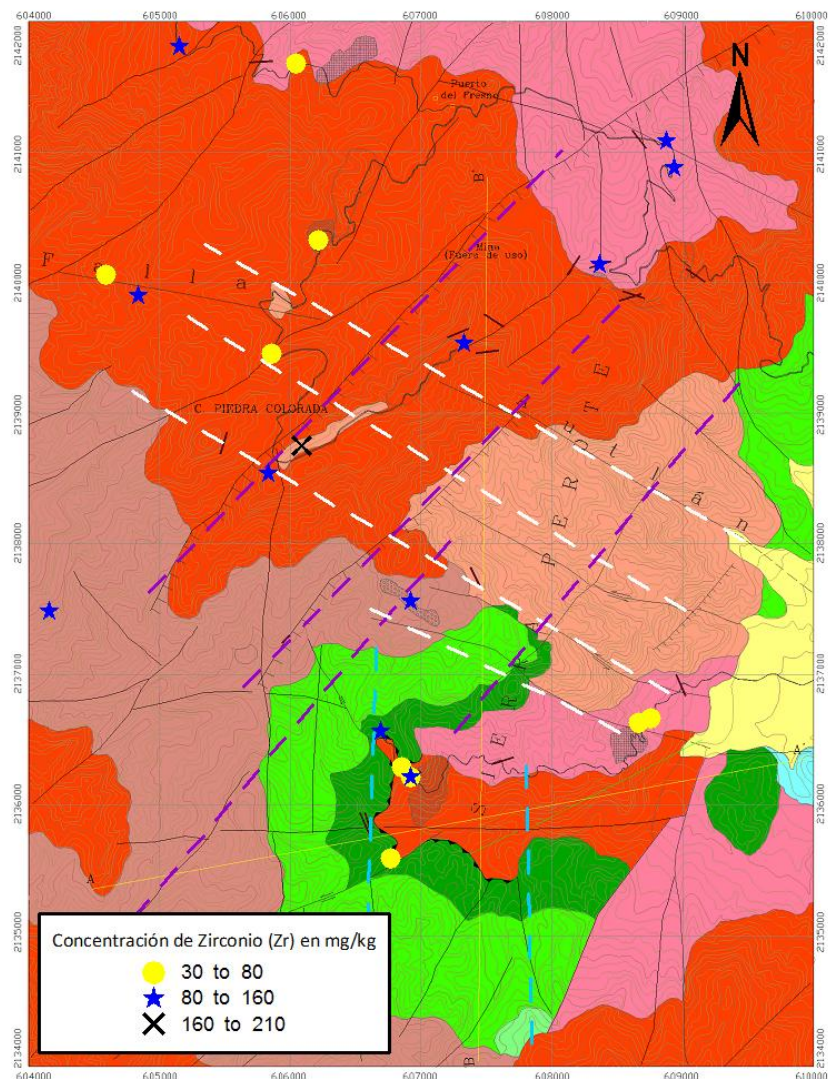


Figura 4.32 Concentración de Zirconio por Fluorescencia de Rayos X en zona sureste

El zirconio tiene una amplia distribución en la zona con tendencia NW-SE y NE-SW, principalmente se distribuye en el intrusivo granodiorítico.

La figura 4.33 se refiere a los resultados de la difracción de rayos x para las muestras que tenían las mayores discrepancias entre los valores de concentración de hierro y susceptibilidad magnética.

La muestra ar59b tiene una muy baja concentración de hierro y baja susceptibilidad magnética debido a su composición mineralógica la cual es compleja y la magnetita que no se encuentra en grandes proporciones es la responsable del valor de la susceptibilidad magnética

La muestra AR112b tiene alta concentración de hierro y alta susceptibilidad magnética eso se debe a que sólo contiene tres minerales y uno de ellos es la magnetita, por tanto tiene una buena proporción de hierro magnético.

La muestra AR127a tiene relativamente baja concentración de hierro y alta susceptibilidad magnética eso quiere decir que el hierro que contiene la muestra en su mayoría es magnético y proviene de la magnetita.

Figura 4.33 Tabla de Difracción de Rayos x

Clave	Fe%	SM	Mineralogía
ar 50 b	2.89	2399	Plagioclasa $(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$
			Hornblenda $CaNa)_{2.26}(Mg,Fe,Al)_{5.15}(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$
			Cuarzo SiO_2
			Magnetita Fe_3O_4
			Hematita Fe_2O_3
AR 112 b	46.37	5213	Magnetita Fe_3O_4
			Hidroxiapatito $Ca_5(PO_4)_3(OH)$
			Hematita Fe_2O_3
AR 127 a	18.43	9551	Magnetita Fe_3O_4
			Pirita FeS_2
			Clorita $(Mg,Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$

Figura 4.34 Tabla completa de muestras con valores superiores respecto al hierro (anómalas) por Fluorescencia de Rayos X en la Zona Sureste.

No.	Clave	X	Y	Ba	Zr	Sr	Zn	Cu	Fe	Mn	Ti	Ca	K	X ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)
				mg/kg					%					
1	ar 04 16	608767	2136667	559	70	280	BLD	BLD	6.04	0.07	0.5	3.82	BLD	3330
2	ar 04 17	608676	2136631	418	70	290	710	BLD	4.39	0.07	0.36	3.18	BLD	2453
3	ar 04 32 a	608941	2140882	785	120	190	BLD	BLD	5.74	0.05	0.59	2.34	1.7	2212
4	AR 04 41 b	606928	2136216	912	100	170	BLD	BLD	5.25	0.08	0.13	3.35	0.91	1421
5	AR 04 43	606859	2136294	488	30	BLD	BLD	BLD	11.38	0.07	BLD	10.38	BLD	5014
6	ar 04 50 a	606218	2140325	432	70	330	BLD	BLD	5.47	0.1	0.54	3.58	BLD	2641
7	ar 50 b	606218	2140325	446	70	350	BLD	BLD	8.86	0.08	0.4	2.43	BLD	7623
8	ar 77c	605855	2139460	644	60	310	310	BLD	6.26	0.19	0.71	3.2	0.93	2578
9	ar04 82d	606088	2138756	BLD	210	BLD	310	BLD	19.13	0.15	0.56	0.84	BLD	3708
10	ar 84 b	606740	2139042	1774	210	210	BLD	BLD	13.89	0.11	0.51	0.7	2.56	7455
11	AR 04 100	605836	2138540	BLD	120	60	70	BLD	4.83	0.15	0.4	2.74	0.84	1873
12	AR 112 b	606603	2138098	BLD	BLD	50	290	330	42.79	0.2	0.89	6.25	BLD	1550
13	AR 127 a	606770	2135594	BLD	BLD	BLD	BLD	390	47.64	BLD	BLD	1.12	BLD	3689
14	AR 127 b	606770	2135594	BLD	50	50	BLD	BLD	17.59	0.21	BLD	9.33	BLD	2155
15	ar 04 128	605153	2141807	545	120	280	BLD	BLD	3.82	0.07	0.28	2.56	BLD	1292
16	ar 04 132	606045	2141680	573	70	280	610	BLD	4.52	0.1	0.45	3.18	BLD	1392
17	ar 04 146 c	604833	2139898	446	120	290	BLD	BLD	5.21	0.12	0.71	3.22	0.78	1292
18	ar 167a	608377	2140137	856	80	270	BLD	BLD	5.73	0.26	0.51	3.49	BLD	3015
19	ar 04 10	608883	2141085	502	110	260	BLD	BLD	5.77	0.08	0.48	3.06	1.31	1722
20	ar 17 b	608676	2136631	BLD	70	150	70	BLD	7.51	0.11	0.39	4.5	BLD	1550
21	ar41b	606928	2136216	BLD	60	30	BLD	BLD	24.94	0.11	BLD	1.6	BLD	3484
22	ar 04 45d	606690	2136564	615	80	280	BLD	BLD	7.22	0.16	0.44	3.71	BLD	463
23	AR 04 82 a	606088	2138756	BLD	190	50	480	BLD	6.78	0.06	0.22	1.15	1.03	2241
24	ar04 113	606921	2137557	630	120	BLD	BLD	160	15.5	BLD	0.49	BLD	3.44	19
25	ar 140	607331	2139532	BLD	90	160	BLD	BLD	6.4	0.19	0.63	2.32	BLD	24
26	ar 04 147	604589	2140065	446	30	330	90	BLD	4.94	0.13	0.24	2.95	BLD	1869
27	ar 04 159 b	606098	2134431	559	90	230	110	BLD	6.28	0.17	0.53	2.55	BLD	1185
28	ar 04 180	604153	2137481	672	100	320	110	BLD	6.57	0.09	0.72	3.25	0.78	2938
Mínimo				BLD	BLD	BLD	BLD	BLD	3.82	BLD	BLD	BLD	BLD	19
Máximo				1774	210	350	710	390	47.64	0.26	0.89	10.38	3.44	7623
Promedio				647	97	218	287	293	11.09	0.12	0.49	3.36	1.43	2507
Desv. Est.				308	47	104	227	119	10.95	0.05	0.17	2.21	0.9	1816

A partir de los mapas generados con los resultados de los análisis químicos y los resultados de difracción, se destaca lo siguiente para Peña Colorada:

- 1) La mineralización se asocia a las estructuras geológicas con dirección NW-SE y NE-SW.
- 2) En Peña Colorada los valores más altos de concentración de elementos y susceptibilidad magnética se asocian a la mineralización que se encuentra como brecha y en la formación Tepalcatepec emplazada entre la caliza y los flujos de andesita.
- 3) En la zona sureste los valores más altos de concentración de elementos y susceptibilidad magnética se asocian al intrusivo granodiorítico.
- 4) El elemento más abundante en ambas zonas después del hierro (Fe) es el calcio (Ca) probablemente se deba a que las rocas que se localizan en las áreas tienen plagioclasas, anfíboles e hidróxidos ricos en Ca.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Para el caso de Peña Colorada se encontró relación de los patrones de mineralización con las fallas NW-SE y NE-SW de la región, así como con la litología descrita como brecha hidrotermal y formación Tepalcatepec.
2. En la zona sureste se observa un bloque parecido al de Peña Colorada en donde también se concentran las mayores abundancias de elementos y susceptibilidad magnética.
3. Ambas zonas tienen ocurrencia muy parecida de metales base lo cual sugiere que pudieron haber sido mineralizadas por los mismos eventos y por la misma composición de magma. La diferencia es que la formación Tepalcatepec favoreció el emplazamiento de dicho magma.
4. La difracción de rayos x permitió reconocer la estructura mineral de algunas rocas y diferenciar entre el hierro magnético que corresponde a la presencia de magnetita y el no magnético que corresponde a la presencia de minerales como hematita o pirita, también de la DRX se puede concluir que al haber susceptibilidad magnética necesariamente hay magnetita y al aumentar la susceptibilidad magnética aumenta el contenido de magnetita en la roca.
5. Partiendo de que se conoce la geología regional y se sabe que la zona se encuentra afectada por eventos mineralizantes y estructurales similares, posterior al vuelo aeromagnético se propone la geofísica a semidetalle realizando un muestreo tipo retícula en donde se tomen valores puntuales de susceptibilidad magnética en campo con el equipo portátil y se construya un mapa de susceptibilidad magnética con la finalidad de filtrar muestras utilizando el modelo de correlación que se determinó en la zona conocida que en éste caso es Peña Colorada después ir a campo, confirmar éstos valores y con esto ahorrar tiempo y dinero en la exploración de hierro valiéndonos de los atributos físicos de las rocas.
6. Se propone como prospecto principal el sur de la zona sureste donde se encuentra el bloque con las mayores concentraciones y la litología que encajona al mineral en Peña Colorada, como prospecto secundario la parte central de la zona sureste pues ahí se localizan valores medios y altos aunque no está presente la formación Tepalcatepec se cumple con el patrón estructural y ahí podría almacenarse mineral.

APÉNDICE

TODAS LAS MUESTRAS DE PEÑA COLORADA

Clave	Coordenadas		Fe	K	Clave	Coordenadas		Fe	K
	X	Y	%	(10 ⁻⁵ SI)		X	Y	%	(10 ⁻⁵ SI)
PC 2	594375	2142300	3.2	346	PC 106b	594711	2144832	6.8	780
PC 4	594316	2142192	2	807	PC 107a	594879	2144797	7.1	480
PC 4b	594316	2142192	2.3	1713	PC 111	595153	2144620	3	1538
PC 4c	594316	2142192	7.5	1596	PC 112	595274	2144525	34.8	6353
PC 5	594371	2141946	2.2	163	PC 113	594885	2144437	9.1	1339
PC 6	594434	2141694	2.6	1251	PC 114a	594407	2142790	3.9	525
PC 9	594227	2142062	1.7	577	PC 114b	594407	2142790	43.8	19353
PC 9b	594227	2142062	6.6	979	PC 114d	594407	2142790	3.8	498
PC 14	594448	2142273	2.4	997	PC 114e	594407	2142790	18.4	11391
PC 15	594266	2142329	7.1	273	PC 115	594179	2142594	16.9	17055
PC 33a	594273	2142457	6.5	905	PC 118	593702	2143836	3.7	538
PC 33b	594273	2142457	4.4	954	PC 122	597767	2144638	2.9	1441
PC 36a	594242	2142627	12.2	9503	PC 127	590073	2141822	2.5	1163
PC 36b	594242	2142627	5.5	6571	PC 128	590284	2141829	5.2	459
PC 36c	594242	2142627	25.7	9907	PC 129 a	590607	2141827	4.7	2453
PC 37	594173	2142767	6.5	902	PC 129 b	590607	2141827	4.7	1824
PC 60	595460	2142739	1.5	1010	PC 130	590632	2141702	5.6	2103
PC 63	596144	2142044	1.6	1476	PC 131 a	590643	2141424	4.9	3233
PC 67	596231	2141941	1	1053	PC 131 b	590643	2141424	5.1	1395
PC 72	596664	2142431	3.5	1562	PC 134	594106	2143145	25.8	6529
PC 73 a	596683	2142334	0.5	570	PC 134a	594106	2143145	44	10315
PC 73 b	596683	2142334	0.4	2808	PC 134b	594106	2143145	1.9	569
PC 74	593676	2142294	1.8	659	PC 134c	594106	2143145	14.7	8498
PC 76	593658	2142396	9.3	1036	pc 134d	594106	2143145	4.5	1395
PC 79	593699	2142735	5.8	861	PC 134 e	594106	2143145	3	230
PC 86	594957	2143909	5	98	PC 134 f	594106	2143145	38.4	16236
PC 86 b	594957	2143909	6.1	796	PC 135 a	594433	2143202	5.1	3113
PC 86 c	594957	2143909	2	243	PC 135 b	594433	2143202	4	5139
PC 86 d	594957	2143909	17.4	239	PC 136	594543	2143227	12.3	12317
PC 86 e	594957	2143909	44.8	19744	PC 138	593800	2143228	6.2	312
PC 89 a	595042	2143954	37.7	14596	PC 139	594481	2144902	5.3	4137
PC 90	594587	2143869	51.5	3864	PC 143	595355	2142612	2.8	159
PC 91 a	594747	2143991	5.2	4371	PC 144	595239	2142811	31.7	1926
PC 91 b	594747	2143991	4.4	1535	PC 147	597781	2139740	3.3	899
PC 92 a	594713	2144117	20.9	17845	PC 148	596200	2139895	3.5	377
PC 92 b	594713	2144117	13.7	5713	PC 150	593270	2138634	6.5	1509
PC 94	594564	2144145	7.1	1929	PC 154a	592580	2140085	1.9	981
PC 97 a	594578	2144879	4.8	1033	PC 154b	592580	2140085	5.1	4046
PC 97 b	594578	2144879	1	949	PC 158	597661	2142134	0.6	553
PC 99 a	594301	2144637	5.6	169	Mínimo			0.4	98
PC 99 b	594301	2144637	5.4	1135	Máximo			51.5	19744
PC 106a	594711	2144832	2.3	351	Promedio			9.4	3379
					Desviación Estándar			11.3	4598

Todas las muestras de la Zona Sureste

Clave	Coordenadas		Fe	K	Clave	Coordenadas		Fe	K
	X	Y	%	(10 ⁻⁵ SI)		X	Y	%	(10 ⁻⁵ SI)
ar 02 2a	609973	2139468	2.9	272	ar 04 45d	606690	2136564	5.6	217
ar04 2b	609973	2139468	3	186	ar 04 48a	606491	2140394	1.6	485
ar 04 2d	609973	2139468	1.9	520	ar 04 48b	606491	2140394	2.8	630
ar 04 3	609968	2139380	1.6	559	ar 04 48e	606491	2140394	1.3	236
ar4b	609652	2139309	2.8	392	ar 04 50 a	606218	2140325	2.9	2399
ar 04 5	609661	2139600	4.1	548	ar 50 b	606218	2140325	11.6	8793
AR-007	609533	2140134	4	440	ar 04 54 a	607549	2139469	3.3	629
ar 04 10	608883	2141085	5.9	730	ar 04 54 b	607549	2139469	3.6	630
ar 04 11	608671	2141098	1.1	219	ar 04 77 a	605855	2139460	2.2	465
ar12b	607684	2141498	0.2	208	ar 04 77 b	605855	2139460	1.7	269
ar 04 14	609264	2137001	3.7	695	ar 77c	605855	2139460	4.9	1733
ar 04 15	609003	2136930	1.9	248	ar 04 78a	606222	2139486	1.9	347
ar 04 16	608767	2136667	2.9	2816	AR 04 82 a	606088	2138756	8.6	832
ar 04 17	608676	2136631	2.8	1148	ar04 82d	606088	2138756	10.8	1764
ar 17 b	608676	2136631	5.8	451	ar 04 83	606550	2138960	1.6	185
ar 04 20	608260	2136324	1.2	741	ar 84 b	606740	2139042	10.6	6686
ar 20 a1	608260	2136324	1.6	434	ar 04 84c	606740	2139042	3.1	517
ar04 20a 2	608260	2136324	2	51	ar 04 91	606334	2136947	3.5	337
ar04 20b	608260	2136324	1.8	415	AR 04 100	605836	2138540	3.7	1019
ar 04 24	606993	2136257	2.4	166	AR 104 a	606816	2136500	2.1	278
AR 04 24	606993	2136257	3.2	255	ar 104 b	606816	2136500	2.9	832
ar 04 26	606691	2136545	3.1	122	ar 104cc	606816	2136500	1.7	159
ar 04 27	606802	2136357	3.2	324	ar 04 105	606753	2136731	2.2	29
ar04 27	606802	2136357	3.1	156	ar 04 107	606815	2137156	1.6	513
ar 04 31a	608771	2140072	4.2	426	ar 111	606867	2137925	1.7	318
ar 04 31b	608771	2140072	4.4	710	ar 112 a	606603	2138098	3	411
ar 04 32 a	608941	2140882	5.3	1086	AR 112 b	606603	2138098	46.4	5213
ar 04 34	607239	2141249	2.4	776	ar04 113	606921	2137557	14.9	173
AR 04 36 a	608994	2136926	2.3	376	AR 115	607083	2137465	4	341
ar 04 36 b	608994	2136926	2.6	505	AR 117	607634	2136763	2.7	236
ar 04 37	608678	2136494	2.7	236	ar 118	608044	2136426	2	212
ar 04 38	608608	2136544	1.6	79	ar 119	606998	2135896	2.4	271
ar04 39	607619	2136343	3.4	736	AR 127 a	606770	2135594	44.1	8355
ar 40	607182	2136350	3.1	345	AR 127 b	606770	2135594	18.4	9551
AR 04 41 a	606928	2136216	2.6	141	ar 127 d	606770	2135594	1.1	114
ar41b	606928	2136216	21.9	437	ar 04 127f	606770	2135594	2	532
AR 04 41 b	606928	2136216	6.8	1243	ar 04 128	605153	2141807	2.9	877
AR 04 43	606859	2136294	11.8	2778	ar 04 131	605771	2141683	2.4	541
ar04 44a	606793	2136474	2.2	197	ar 131a	605771	2141683	1.2	215
ar 04 44 b	606793	2136474	2.4	229	ar 04 132	606045	2141680	3	1161
ar 04 45b	606690	2136564	3.3	125	AR-133	606276	2141526	2.8	491
ar 04 45c	606690	2136564	2.3	353	ar 04 134	606572	2141801	0.9	254
					ar 04 137	606983	2139183	2.5	218
					ar 140	607331	2139532	5.2	380

Clave	Coordenadas		Fe	K
	X	Y	%	(10 ⁻⁵ SI)
ar 04 146b	604833	2139898	4.4	729
ar 04 146b	604833	2139898	2.5	303
ar 04 146 c	604833	2139898	4.1	1096
ar 04 147	604589	2140065	6	757
AR 04 149	605191	2139776	4.5	249
ar 04 150	607464	2135847	1.6	184
AR-151	607408	2135737	0.7	300
AR-159	606098	2134431	4.7	430
ar 04 159 b	606098	2134431	5.6	719
ar 167a	608377	2140137	4.5	1113
ar 167b	608377	2140137	2.3	187
AR-168	608166	2140131	4.9	832
AR-169	607724	2140507	4.1	493
ar 04 180	604153	2137481	6.7	634
AR-181	606795	2135690	2.4	81
ar 184	606405	2135583	4.5	417
AR-196	607545	2137534	3.9	518
AR-197	607418	2137744	2.6	160
AR-198	607206	2137857	2.9	187
Mínimo			0.2	29.3
Máximo			46.4	9551
Promedio			5	870
Desviación Estándar			6.6	1649.8

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Sahagún Guillermo. 2002. El hombre y los materiales. Fondo de Cultura Económica, México, pp. 46-58.
- Álvarez Manuel. 1958. Provincias Fisiográficas de la República Mexicana XX Congreso Geológico Internacional, p 18.
- Bateman Alan M. 1982. Yacimientos minerales de rendimiento económico, Editorial Omega 6ta edición, Barcelona, pp. 607-609.
- CAMIMEX. 2008. (Cámara Minera de México). Informe anual 2008, LXXI Asamblea General Ordinaria, pp. 13-15 y 100-105.
- CONAGUA. 2009. (Comisión Nacional del Agua). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Minatitlán, Estado de Colima, p. 7.
- COREMI. 1994 (Consejo de Recursos Minerales). Monografía Geológico-Minera del Estado de Colima, pp. 20-40.
- Corona-Esquivel Rodolfo, Henríquez Fernando, 2004, "Modelo Magmático del Yacimiento de Hierro Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de Hierro en México", Boletín del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México 2004, pp. 98.
- IGL. 2009 (Instituto de Geología). Centeno-García Elena, Tolson Jones Gustavo, Camprubí Antonio, Martín Romero Francisco, Ortega Berlaine, Bolaños Daniel. Estudio geológico-estructural en las áreas de Peña Colorada, Arrayanes y La Fundición, Estado de Colima-México, Informe Técnico, Inédito.
- INEGI. 1991. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). www.inegi.gob.mx
- Lozano-SantaCruz Rufino, Romero FM y Zamora Martínez O, 2008. Cuantificación de Manganeso y Hierro en menas de Mn usando el método tradicional de WD-FRX y

- un instrumento portátil (PFXRS): Comparación de resultados. GEOS, Vol. 28, p. 158.
- Pérez Martínez I, Romero FM, Zamora Martínez O, Urrutia Fucugauchi J, 2009. Susceptibilidad magnética como indicador de la contaminación de suelos debido a la dispersión de residuos mineros (jales). GEOS, Vol. 29, p56
- Peters William C. 1978. Exploration and mining geology. University of Arizona 2nd Edition, p 401.
- Romero FM, Prol-Ledesma RM, C Canet, Núñez-Alvarez L, Pérez-Vázquez R, 2009. Acid drainage at the inactive Santa Lucia mine, western Cuba: natural attenuation of arsenic, barium and lead, and behavior of rare earth elements, Applied Geochemistry, 25, pp. 716-727.
- Rose AW, Hawkes HE y Webb JS. 1979, Geochemistry in Mineral Exploration 2nd edition, London UK, Academic Press, pp 10-39.
- Sedlock Richard, Ortega-Guiterrez Fernando, Speed Robert C. 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of México. Special Paper 278. The Geological Society of América, pp 37-42.
- SGM. 2008. (Servicio Geológico Mexicano). Panorama Minero del Estado de Colima, www.sgm.gob.mx.
- Tritlla Jordi, Camprubí Antoni, Centeno-García Elena, Corona-Esquivel Rodolfo, 2003 “Estructura y Edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG”. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.20 Núm3, p 20.
- Zamora Martínez O, Romero FM y Lozano-SantaCruz R. (2008). Evaluación del desempeño de un analizador portátil de fluorescencia de rayos X en la determinación de la composición elemental de residuos mineros. GEOS, Vol. 28 pp. 161-162.