



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS ESPACIAL GEOLÓGICO-MINERO PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE
INTERÉS PROSPECTIVO EN LOS MUNICIPIOS DE ACTOPAN Y PACHUCA,
ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
MENCION GEOLOGIA**

CATARINO RODRÍGUEZ GÓMEZ

PROFESORES GUÍA

Dr. XAVIER EMERY

Dr. VÍCTOR MAKSAEV JURCHUC

MIEMBROS DE LA COMISION

Dr. BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

Dr. ALVARO PUIG GODOY

SANTIAGO DE CHILE

NOVIEMBRE 2012

RESUMEN

Esta tesis pretende desarrollar una metodología piloto para identificar áreas favorables para la búsqueda y prospección de nuevos depósitos minerales, mediante el análisis espacial de datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG). La información base utilizada es la cartográfica geológico-minera regional, geoquímica, geofísica y temática especializada generada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) de la zona limítrofe entre los municipios de Pachuca-Actopan, estado de Hidalgo, México

Se utilizaron capas de información georreferenciada, cuyas coberturas básicas fueron: geología regional, datos magnetométricos, geoquímicos (muestras de sedimento de arroyo activo), alteraciones, muestreos cuantitativos y cualitativos, teledetección satelital, estructural y topografía. Estas coberturas se integraron en un canevá geográfico, interpretados mediante análisis espacial, cada rasgo en base a los interpretaciones y resultados de trabajos de campo en combinación con los cartográficos y realces de imágenes, permitieron identificar y definir áreas geográficas de interés prospectivo en la zona de estudio.

Toda esta información fue combinada con un método analítico llamado Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Este método descompone un problema de decisión complejo multi-criterios en una jerarquía basándose en una comparación por pares de importancia de diferentes criterios y subcriterios para cada nivel de información, que al final resultan pesos relativos por cada capa y fueron combinación con el SIG.

La metodología utilizada para cada uno de los pesos calculados mediante el proceso analítico fue procesada de acuerdo a cada uno de los layers especificados mediante una matriz por pares, de tal manera que el resultado de ellos fue la intersección de cada una de las capas con sus pesos calculados, generando como resultado un mapa de influencia de las posibles áreas de prospección minera.

En total se detectaron tres áreas de potencial interés, según la prioridad como se mencionan a continuación: Plomosas-Benito Juárez, Mineral del Chico-San Sebastián Capulines, San José Tepenené-El Arenal-Capula y Pachuca-Real del Monte.

La metodología desarrollada en esta tesis ha demostrado la capacidad de generar áreas de interés, metodología que puede ser empleada a favor para otras áreas de estudio en México.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado especialmente a toda mi familia, y primordialmente a mi esposa **PAULA** por su apoyo moral, comprensión, valentía y su fuerza para sacar adelante a mi familia en las buenas y en las malas.

A mis hijas, **Adriana, Paula Yaridia, Jennifer Lizbeth** que fueron fuente de mi inspiración y ejemplo para seguir adelante.

Y a ese pequeño ser **Jesus Adrian**, que trajo a nuestras vidas alegría, iluminación y esperanza.

Se los dedico de corazón, pues ellos fueron la fuente de energía e inspiración para culminar este proyecto, a pesar de los momentos difíciles que se dieron en su momento, agradezco a dios por su infinita bondad de protegerlos y ver realizado este sueño junto con todos mis seres queridos y lograr una meta más en mi vida.

A mis padres que en paz descansen, se los dedico con mucho cariño y siempre les agradeceré por haberme dado la vida.

Con especial mención se lo dedico a mi querida abuela que siempre estoy en sus oraciones.

A todos mis hermanos, hermanas por su apoyo moral y comprensión, por sus bendiciones y deseos.

A toda la familia Malváis por sus alicientes y su ayuda en todo momento y estar cerca de mi familia con su valioso apoyo.

Y a todas las personas que de una u otra manera se hicieron partícipes para que este proyecto se llevara a cabo.

AGRADECIMIENTOS

De una manera muy especial deseo agradecer al Servicio Geológico Mexicano por brindarme la gran oportunidad y el apoyo económico para llevar a cabo el desarrollo de esta Maestría.

Este trabajo no habría sido posible si no hubiese recibido el apoyo moral y de alientos así como su gran aporte profesional a todo el personal que estuvo involucrado durante el proceso de este proyecto y un agradecimiento a las áreas de Geofísica, Geomática y Geología Ambiental por su valioso aporte cuando lo necesite.

Haciendo mención especial quiero agradecer a todas y cada una de las personas que integran con orgullo este gran organismo, que de una u otra forma me brindaron su apoyo moral y económico en los momentos tan difíciles que pase, así como a todos los compañeros y compañeras de la Facultad de Geología de la Universidad de Chile.

A mis profesores guía Dr. Xavier Emery y Dr. Víctor Makshev Jurchuc por su paciencia, generosidad, sencillez y gran profesionalismo al brindarme la oportunidad de guiarme durante este trabajo, que con su experiencia y gran capacidad fueron fundamentales para culminar este proyecto.

A los miembros de la comisión Drs. Brian Townley Callejas, Alvaro Puig Godoy por su gran sencillez y amabilidad en sus revisiones, aportaciones y comentarios que sirvieron para enriquecer este trabajo.

Al Ing. Héctor A. Alba Infante por su paciencia, orientación y los aportes profesionales como guía cuando los fui requerido y de estar siempre presente en los momentos que solicite su colaboración. Al Ing. Bernardino Delgado Granados y a todo el personal de la Gerencia de Documentación Técnica, gracias por su valioso apoyo en todo momento que lo solicite y por su gran apoyo moral e incentivo en los momentos tan difíciles cuando más lo necesite.

A Ing. Geóloga Sonia Guiza González de Colombia, por su gran aporte profesional en la confección de este trabajo, al M. en C. Alejandro Rafael de la Luz D'elia de la Universidad Autónoma de Querétaro por su valiosa aportación, orientación y apoyo y al M. en C. Rafael Gutiérrez Aguilar por su gran aporte en esta fase final.

A todos mis compañeros, compañeras y amigos de Chile y extranjeros del área de posgrado de Geología, gracias por brindarme su hospitalidad y su valiosa amistad. A los profesores de la Facultad de Geología de la Universidad de Chile, por ofrecer siempre su disponibilidad, tiempo, apoyo y su excelente amistad.

CONTENIDO

RESUMEN

CAPITULO I. INTRODUCCION	1
I. Introducción general	1
I.1.1. Planteamiento del problema	2
I.1.2. Antecedentes	2
I.2. Objetivos.	5
I.2.1. Objetivo general	5
I.2.2. Objetivos específicos	5
I.3. Hipótesis y alcances del trabajo	5
I.4. Metodología	6
I.5. Localización y Vías de Acceso	7
I.6. Geografía y aspectos Generales	9
I.7. Características Físicas	11
I.7.1. Rasgos Fisiográficos e Hidrográficos	11
CAPITULO II. PRESENTACION DE LOS DATOS	20
II.1. Marco Geológico	20
II.1.1. Litología	20
II.1.1.1. Sistema Cretácico	20
II.1.1.2. Sistema Terciario	23
II.1.1.3. Cuaternario	25
II.1.1.4. Rocas Intrusivas	26
II.2. Estructuras	28
II.3. Yacimientos Minerales	32
II.3.1. Características generales	32
II.4 Información Satelital	39
II.4.1. Procesos de elaboración	39
II.4.2. Interpretación de la imagen de Satélite	40
II.4.3. Razones de banda (Ratios)	41
II.5. Información Geofísica Campo Magnético	45
II.5.1. Procesos de elaboración	45
II.5.2. Magnetometría, Campo total	46
II.6 Procesos de información y Variables a utilizar en el SIG	52
II.6.1. Proceso de Análisis Jerárquico	54

CAPITULO III. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS GEOQUIMICOS	55
III.1. Descripción de los Datos	55
III.1.1. Zona Actopan	55
III.1.1.1. Estadísticas Básicas	57
III.1.1.2. Correlación entre elementos	59
III.1.1.3. Nubes de dispersión	61
III.1.1.4. Análisis en componentes principales	64
III.1.1.5. Interpolación Espacial	68
III.1.1.6. Conclusiones	71
III.2.1. Zona Pachuca	72
III.2.1.1. Estadísticas Básicas	72
III.2.1.2. Correlación entre elementos	76
III.2.1.3. Nubes de dispersión	79
III.2.1.4. Análisis en componentes principales	80
III.2.1.5. Interpolación Espacial	87
III.2.1.6. Conclusiones	88
CAPITULO IV. ANALISIS Y ADECUACION EN EL SIG	92
IV.1. Introducción	92
IV.2. Componentes del SIG en un Sistema de Información Espacial	92
IV.3. Método de integración y adecuación de datos espaciales	92
IV.4. Funcionalidad del Sistema de Información Geográfica	96
IV.5. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) dentro del SIG	98
IV.5.1. Metodología, desarrollo del AHP	98
IV.5.2. Desarrollo del Proceso de Análisis Jerárquico AHP	99
IV.5.3. Generación de procesos del AHP con el SIG	105
CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	111
V.1. Introducción	111
V.2. Interpretación y distribución espacial del Análisis Estadístico de la geoquímica	111
V.3. Interpretación del proceso de análisis jerárquico (AHP) en combinación con el SIG	112
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
VI.1. Conclusiones	136
VI.2. Recomendaciones	138

VII. REFERENCIAS

139

ANEXOS

144

Anexo I

IA.-Mapa geológico estructural de la zona Actopan-Pachuca, escala 1:60.000

Anexo II

Generación de Metadatos para el Sistema de Información Geográfica (SIG)

Anexo III

(Archivos PDF en CD adjunto)

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. I. 1. Plano de Localización del área de estudio Actopan-Pachuca	8
Fig. I. 2. Limites estatales que delimita al estado de Hidalgo respecto a su ubicación en la Republica Mexicana	9
Fig. I. 3. Localización de las áreas Plomosas, Santa Rosa, Capula y Mineral del Chico de la Comarca Minera.	10
Fig. I. 4. Rasgos Fisiográficos presentes en la zona de estudio.	12
Fig. I. 5. Provincias y Sub-Provincias de la zona de estudio.	14
Fig. I. 6. Orografía de las áreas con mayor altitud en la zona de estudio.	15
Fig. I. 7. Principales Volcanes del Eje Neovolcánico de México.	16
Fig. I. 8. Sub-cuencas y Micro-cuencas con la precipitación media anual tomada en base a estaciones hidrométricas de la zona de estudio Fuente CNA-2000.	17
Fig. II. 1. Geología de la zona norte del área de estudio	22
Fig. II. 2. Geología de la zona volcánica situada al sur de la zona de estudio	24
Fig. II. 3. Estructuras de la Zona Norte Actopan.	29
Fig. II. 4. Estructuras principales de la zona sur de estudio (Pachuca).	30
Fig. II.5. Principales estructuras relacionadas con la mineralización zona sur de estudio.	31
Fig. II. 6. Distrito Minero Pachuca-Real del Monte y sus principales estructuras mineralizadas.	34
Fig. II. 7. Principales estructuras mineralizadas del Distrito Minero el Chico.	35
Fig. II. 8. Principales estructuras mineralizadas del Distrito Arévalo-Capúla.	37
Fig. II. 9. Imagen de satélite Landsat con bandas RGB 741 de la zona de estudio.	41
Fig. II. 10. Firmas espectrales de la USGS re-muestreadas con ALI y ASTER.	42
Fig. II. 11. Razones por óxidos de la zona de estudio.	43

Fig. II. 12. Razones por arcillas de la zona de estudio.	44
Fig. II. 13. Mapa de Campo Magnético Total que representa un dipolo magnético normal para el hemisferio norte.	46
Fig.II.14. Representación de la anomalía magnética generada por un cuerpo magnético en el campo magnético terrestre.	47
Fig. II.15. Interpretación de frecuencias magnéticas de la zona de estudio.	48
Fig. II.16. Interpretación de la estructura regional que marca el límite norte del distrito minero Pachuca-Real del Monte, en base a una imagen magnetométrica regional.	49
Fig. II. 17. Interpretación de lineamientos regional y local en dirección NW-SE asociado a fallas interpretadas, interpretadas en base a la imagen magnetométrica residual.	50
Fig. II.18. Interpretación de zonas de alteración que se presentan en la zona de estudio, identificadas a partir del campo magnético residual (Filtro Pasa Altas).	51
Fig. III. 1. Distribución de los muestreos de sedimentos de arroyo y su posición sobre las corrientes hidrográficas.	56
Fig. III. 2. Distribución de valores máximos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) de zona Actopan.	58
Fig. III. 3. Representación de datos atípicos del (Au, Pb, Zn) en base a histogramas para la zona norte (Actopan).	59
Fig. III. 4. Coeficiente de correlación.	60
Fig. III. 5. Rangos de coeficiente de correlación significativo.	60
Fig. III. 6. Gráficos de Dispersión para el Au, Ag, Pb, Cu y Zn de la zona I Actopan, en base a los muestreos de los sedimentos de arroyo.	62
Fig. III. 7. Mapa de dispersión por las variables Au, Ag, Pb, Cu, Zn, zona Actopan.	63
Fig. III. 8. Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2. Arriba Nube de dispersión (F1F2). Abajo Mapa con valores atípicos resaltados.	66

Fig. III. 9. Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F3, zona Actopan. Arriba Nube de dispersión (F1F3). Abajo Mapa con valores atípicos resaltados.	67
Fig. III. 10. Representación de los factores F1, F2, F3 en un plano geológico para la zona Actopan.	68
Fig. III. 11. Interpolación de las variables Au, Ag, Pb, Cu, usando el método IDW para la zona Actopan.	69
Fig. III. 12. Interpolación del Zn, usando el método IDW para la zona Actopan.	70
Fig. III. 13. Distribución espacial de probables zonas anómalas (Actopan).	70
Fig. III. 14. Puntos de muestreo de sedimentos sobre la red hidrográfica..	73
Fig. III. 15. Distribución de valores máximos o anómalos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) zona sur (Pachuca).	76
Fig. III. 16. Representación de los datos atípicos del Au, Ag, Pb, Cu, Zn, en base a los histogramas zona sur (Pachuca).	77
Fig. III.17 Nube de dispersión del Au, Ag, Pb, Cu y Zn de la Zona II Pachuca.	80
Fig. III. 18. Mapa de dispersión por las variables Au, Ag, Pb, Cu, Zn, de la zona II (Pachuca).	81
Fig. III. 19 Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2 zona Pachuca. Arriba Nube de dispersión (F1-F2). Abajo Mapa con valores atípicos.	85
Fig. III. 20. Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2 zona Pachuca Arriba. Nube de dispersión (F1, F2). Abajo. Valores atípicos.	86
Fig. III. 21. Representación en un plano geológico de los factores F1, F2, F3 y las variables atípicas de la zona II (Pachuca).	87
Fig. III.22. Interpolación de las variables Au, Ag, Pb, Cu, usando el método IDW para la zona Pachuca.	88
Fig. III. 23. Interpolación de la variable Zn, usando el método IDW para la zona Pachuca.	89
Fig. III. 24. Zonas anómalas con isovalores de las variables zona Pachuca.	89

Fig. IV.1. Interacción de las componentes en un SIG dentro una exploración	93
Fig. IV. 2. Superposición de las capas de información.	95
Fig. IV.3. Representación esquemática de los contactos y su tabla de atributos interrelacionados.	97
Fig. IV. 4. Diagrama de flujo del modelo AHP para el mapeo de áreas prospectivas.	98
Fig. IV. 5. Mapa geológico elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio.	107
Fig. IV.6. Mapa de alteraciones elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio.	107
Fig. IV. 7. Mapa de estructuras elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio.	108
Fig. IV.8. Mapa de vetas elaborado a partir de los pesos relativos de importancia en la zona de estudio.	109
Fig. V.1. Zonas anómalas interpretadas de acuerdo a la intersección de los pesos relativos de los niveles de información de la zona de estudio.	114
Fig. V.2. Zonas anómalas en combinación con el Au y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.	118
Fig. V.3. Zonas anómalas en combinación con Ag y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.	119
Fig. V.4. Zonas anómalas en combinación con el Pb y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.	119
Fig. V.5. Zonas anómalas en combinación con el Cu y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.	120
Fig. V.6. Zonas anómalas en combinación con el Zn y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.	120
Fig. V.7. Comparación de las áreas anómalas del Au en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.	122

Fig. V.8. Comparación de las áreas anómalas de Ag en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.	123
Fig. V.9. Comparación de las áreas anómalas del Pb en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.	124
Fig. V.10. Comparación de las áreas anómalas del Cu en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.	125
Fig. V.11. Comparación de las áreas anómalas del Zn en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.	126
Fig. IV. 12. Delimitación de zonas anómalas por Ag, Pb, Zn en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área Plomosas-Benito Juárez.	129
Fig. V. 13. Delimitación de zonas anómalas por Au, Ag, en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área El Arenal-San José-Capúla.	130
Fig. V.14. Delimitación de zonas anómalas por Ag, Pb, Pb en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área San Sebastián Capulines-El Chico.	132
Fig. V.15. Delimitación de zonas anómalas de Ag, Au en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área Pachuca-Real del Monte..	134
Fig. V.2. Zonas anómalas interpretadas de acuerdo a la intersección de los pesos relativos de los niveles de información de la zona de estudio.	114
Sección II. 1. Sección Geológica donde se indica la ubicación estratigráfica de la zona NE de la zona de estudio (Arellano-Gil et al, 2005).	28

Foto II. 1. Panorámica de la parte sur de la zona de estudio, tomada del archivo técnico No. 1374CURRR0001 (Lee et, al 1974). 32

Cuadro IV.1. Pesos y valores de las capas utilizadas en la zona de estudio. 106

Cuadro II.1. Datos magnetométricos y razones utilizadas en la zona de estudio. 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Características de las cuencas hidrológicas de la zona de estudio. 18

Tabla I.2. Características hidrométricas (Isoyetas, Isotermas) de las cuencas hidrológicas de la zona de estudio. 18

Tabla II.2. Combinación en falso color RGB, para geología. 39

Tabla II.3 Definición de atributos y escala de medición de la zona de estudio. 53

Tabla II.4 Matriz de comparaciones pareadas para el uso de las variables. 54

Tabla III.1. Parámetros estadísticos básicos de la zona I (Área Actopan). 57

Tabla III.2. Matriz de correlación lineal para la zona I (Área Actopan). 61

Tabla III.3. Valores propios y varianza acumulada de la zona Actopan con las variables Au, Ag, Pb, Cu y Zn. 64

Tabla III.4. Factores de correlación de la zona Actopan. 65

Tabla III.5. Parámetros estadísticos básicos de la zona sur de estudio (Pachuca). 74

Tabla III.6. Promedio de la abundancia de determinados elementos menores y traza de la corteza terrestre en diferentes rocas y suelos en ppm, (Levinson, 1980). 75

Tabla. III.7. Matriz de correlación para el Au y los demás elementos de la zona II (Área Pachuca). 78

Tabla III.8. Correlación lineal entre elementos de la zona Pachuca. 79

Tabla III.9. Valores propios y varianza acumulada. 82

Tabla III.10. Principales factores y su relación con las variables originales. 83

Tabla III.11-III.12. Asociaciones positivas y negativas entre factores y variables de la zona Pachuca.	84
Tabla IV.1. Datos primarios disponibles y sus características.	94
Tabla IV.2. Capas principales del proyecto SIG.	96
Tabla IV.3. Base de datos geológico de la zona de estudio en general.	96
Tabla IV.4. Atributos y prioridad de las capas espaciales en la zona de estudio.	100
Tabla IV.5. Escala de preferencias para valorar la importancia de los atributos.	101
Tabla IV.6. Resultados de la matriz calculada por comparaciones pareadas.	102
Tabla IV.7. Resultados de los pesos calculados para los atributos de las capas.	103
Tabla IV.8. Suma ponderada y vector de consistencia de los atributos.	103
Tabla IV.9. Índice de Inconsistencia aleatoria para el número de elementos a ponderar.	104
Tabla IV.10. Índice de consistencia de la zona de estudio en general.	105
Tabla IV.11. Pesos promedios por variable en la zona de estudio.	110

CAPITULO I

I. INTRODUCCION GENERAL

Los mapas geológicos constituyen una herramienta base para la exploración minera y son el punto de partida para estudios temáticos en áreas geográficas, geológicas y ambientales, como son hidrogeología, ordenamiento territorial, impacto ambiental, exploración minera, desarrollos urbanos, riesgos meteorológicos, etc. La integración de la información geológica con otros datos, tales como geología económica, geoquímica, geofísica, etc., es fundamental para definir áreas de interés prospectivo. Esta integración es posible mediante los sistemas de información geográfica (SIG), los que cumplen con todos los requisitos para convertirse en elementos esenciales en todo tipo de actividad relacionada al área de ciencias de la tierra y otras áreas afines.

Los SIG son herramientas que permiten el manejo de grandes volúmenes de datos georreferenciados (Ej. mapas temáticos) y han tenido un notable desarrollo en las últimas décadas. Este proyecto se enfoca en el análisis de la información geológico-minera mediante el SIG, partiendo de información básica disponible en el banco de datos del Servicio Geológico Mexicano (SGM), sobreponiendo las diferentes capas o mapas temáticos geológico-mineros disponibles, para su interpretación y definición de áreas de interés prospectivo.

A través de los sistemas de información geográfica se pueden desarrollar infinidad de procesamientos aprovechando la información disponible en el banco de datos (Geoinfomex), del Servicio Geológico Mexicano (SGM), para diferentes aplicaciones que se puedan presentar. La exploración minera a través de estos sistemas es primordial y básica para el inicio en el análisis de información en la búsqueda de nuevos depósitos minerales. Existen otros métodos para determinar prospectos minerales, como los procesos de análisis jerárquico (AHP), diseñados para resolver problemas complejos de criterios múltiples y combinados con los SIG, que dan respuesta o salida de información mediante formulas matriciales usando variables de información para generar pesos específicos por cada nivel del mismo y como resultado generar áreas de influencia de los datos combinados y obtener mapas de aptitud por cada una de las variables.

En la región, a pesar de que se ha generado un gran acervo de información en "papel" no existe un estudio que esté relacionado con este tipo de análisis espacial que integre la información geológica económica, razón por lo que se pretende elaborar la metodología antes mencionada con la base de datos recopilados en las cartas escalas 1:250.000 y 1:50.000 y que son de gran

utilidad para este tipo de estudios y para prospectar en otras zonas que se estimen de interés, proponiendo como metodología utilizar esos datos y herramientas digitales para definir áreas de interés prospectivo.

I.1.1. Planteamiento del problema

Considerando que el SGM guarda en sus archivos información cartográfica a distintas escalas en un banco de datos digital y que no existe un procedimiento documentado para explorar yacimientos minerales de rendimiento económico, el presente trabajo intenta mostrar una metodología conducente a este tipo de exploración, utilizando la información existente y herramientas tecnológicas actuales.

La motivación de este proyecto es principalmente trabajar con el gran volumen de información georreferenciada generada por la Institución para hacer una interpretación de los datos obtenidos de campo procesados en las zonas cubiertas por el SGM sobre el proyecto de elaboración cartográfica escala 1:250.000 y 1:50.000, generándose una base de datos digital relacionada con diferentes niveles de información. Se partirá de la geoquímica de sedimentos de arroyo realizando un análisis estadístico, apoyándose de la geología, estructuras y otras herramientas. Esto es parte de un proyecto piloto para definir el trabajo que a futuro se pueda implementar en cualquier estudio a realizar usando los SIG para la búsqueda de áreas de interés prospectivo.

I.1.2. Antecedentes

En los años 1960 y 1970 emergieron nuevas tendencias en la forma de utilizar los mapas para la valoración de recursos y planificación. Dándose cuenta de que las diferentes coberturas sobre la superficie de la tierra no eran independientes entre sí, sino que guardaban algún tipo de relación, se hizo latente la necesidad de evaluarlos de una forma integrada y multidisciplinaria. Una manera sencilla de hacerlo era superponiendo copias transparentes de mapas de coberturas sobre mesas iluminadas y encontrar puntos de coincidencia en los distintos mapas de los diferentes datos descriptivos. Luego, esta técnica se aplicó a la emergente tecnología de la informática con el procedimiento de trazar mapas sencillos sobre una cuadrícula de papel ordinario, superponiendo los valores de esa cuadrícula y utilizando la sobreimpresión de los caracteres de la impresora por renglones para producir tonalidades de grises adecuadas a la representación de valores estadísticos, en lo que se conocía como sistema reticular. Sin embargo, estos métodos no se encontraban desarrollados lo suficiente y

no eran aceptados por profesionales que manejaban, producían o usaban información geológica cartográfica.

A finales de los años 70's el uso de computadoras progresó rápidamente en el manejo de información cartográfica y se afinaron muchos de los sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas, geológicas, hidrográficas. De la misma manera, se estaba avanzando en una serie de sectores ligados, entre ellos la topografía, la fotogrametría y la percepción remota. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provocó una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas relacionadas con la cartografía, pero a medida que se aumentaban los sistemas y se adquiría experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de información espacial, reuniéndolos en verdaderos sistemas de información geográfica para fines generales.

A principios de los años 80's, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se habían convertido en un modelo plenamente operativo, a medida que la tecnología de cómputo se perfeccionaba, se hacía menos costosa y gozaba de una mayor aceptación. Actualmente se están instalando rápidamente estos sistemas en los laboratorios de investigación, las instituciones académicas, la industria privada, la industria minera y las instalaciones militares y públicas.

Hoy en día este tipo de estudios con el uso y gran avance tecnológico de los SIG ha permitido reducir en tiempo, espacio y recursos los trabajos desarrollados permitiendo simultáneamente conclusiones más rápidas, precisas y objetivas.

Breve reseña histórica

Existen varios estudios que se han realizado en la zona de trabajo desde visitas de reconocimiento, exploración geológico-minera, exploración geofísica. Por mencionar algunos otros, se citan a continuación los principales por su orden de importancia.

García y Martínez (1959) realizaron un estudio utilizando y apoyándose en la geofísica aplicada como auxiliar en la exploración de los yacimientos argentíferos de los distritos de Pachuca y Real Del Monte, Estado de Hidalgo. Dadas las características geológicas de la zona, los únicos métodos geofísicos susceptibles de servir, en principio, como auxiliares en la exploración de los yacimientos argentíferos de Pachuca y Real del Monte, fueron el magnético y el eléctrico de resistividad.

Por su parte, Gómez y Ramos (1980) efectuaron un levantamiento geológico-geoquímico de detalle en el área Paricutín-Pachuca, Hidalgo, cubriendo un área de 300 km², tendiente a la

investigación de la posible continuación de la veta Paricutín, hacia el poniente, la cual presentaba los valores más altos en oro y plata del distrito Pachuca, hasta que fue perdida al ser desplazada por una falla. Dicho levantamiento consistió en la recolección de 12.000 muestras de suelo, que fueron analizadas por mercurio en un laboratorio de campo. Los resultados fueron tratados estadísticamente e interpretados para obtener tres poblaciones de datos, los que corresponden a dos subzonas bien definidas que son: Subzonas de valores anómalos de tercer orden comprendiendo un intervalo de 0->1.000 ppm en las áreas "norte" y "Paricutín"; y una subzona que abarca a dos poblaciones de datos anómalos de 2º y 1º orden, con intervalos de 250->10.000 ppb y 25.000->100.000 ppb Hg, respectivamente, que se emplazan en la subzona de "El Venado", resaltando en importancia esta última. Paralelamente se efectuó un levantamiento geológico de detalle a lo largo de las líneas de muestreo y se elaboró un plano geológico estructural de escala 1:10.000, con base topográfica en planos del Consejo de Recursos Minerales (hoy SGM).

En el distrito minero Actopan, Míreles et al. (1982) realizaron un Informe final del área La Negra, Estado de Hidalgo con un estudio realizado para el proyecto Plomosas-Actopan. El área que comprende el proyecto Plomosas aloja tanto rocas de origen ígneo como una gran cubierta de rocas sedimentarias. El tipo de mineralización no ha sido completamente definido, pero se considera que el origen es en la mayor parte, en orden de importancia, del tipo hidrotermal emplazado en espacios abiertos formados por erosión hídrica en rocas carbonatadas, cavernas de disolución (paleokarst) y del tipo hidrotermal en menor grado. La finalidad de este estudio es la de determinar áreas de interés para que sean objeto de una posterior etapa de estudios de campo de mayor detalle y sus resultados justifican continuar con métodos más directos, proponer una exploración con barrenos u obra directa sobre el o los afloramientos posibles cuerpos mineralizados emplazados en los diferentes tipos de roca, en este caso en específico, sobre de la formación El Abra, que en el contacto con formaciones arcillosas ha desarrollado cavidades de disolución con posibilidades de alojar mineralización económicamente importante.

Por su parte, Espinoza y Silva (1980) hicieron una exploración geológico-minera en el distrito de "Plomosas, Hidalgo" que se encuentra situado en la parte centro-oriental del estado de Hidalgo. El trabajo se realizó en las siguientes etapas: reconocimiento de la región, geología regional escala 1:10.000, levantamiento geológico-minero y muestreo en las minas La Negra socavón superior e inferior, Tres Reyes, San León, San Juan, Actopan y El Águila, Catas, pequeños laboreos y tiros adyacentes, así como secciones que muestran las obras mineras estudiadas. Se realizó geología de detalle en el área El Águila, escala 1:1.000, en una superficie de 1.5 km² localizada en la porción centro-oriente de la región de Plomosas, Hidalgo, geoquímica de

sedimentos de arroyo en el área levantada con geología regional, propuesta para tratar de identificar zonas anómalas, donde posiblemente existen estructuras mineralizadas tipo paleo karst (Baldomero *et al.*, 2004). Se usó geofísica con el aparato Radem VLF-UW Receiver y geología de semi-detalle, en el área La Negra, que abarca una superficie de 1 km². Estos trabajos se efectuaron en el área San León-San Juan-Actopan. Las rocas que afloran en el área Plomosas son sedimentarias, ígneas extrusivas, de edad Cretácico medio y Terciario (Plioceno) y rocas ígneas intrusivas (hipabisales) clasificados como diques riolíticos y andesíticos y aluviones del Cuaternario.

I.2. OBJETIVOS.

I.2.1. Objetivo General.

El objetivo general del presente estudio es identificar áreas de interés prospectivo y priorizarlas combinando datos geoquímicos, geológicos, estructurales y otras herramientas como imágenes satelitales y magnetometría visualizadas y analizadas en un Sistema de Información Geográfica, sobreponiendo estas capas de información para su interpretación.

I.2.2. Objetivos Específicos.

Implementar una metodología que permita de una manera objetiva y simplificada, conocer las diferentes etapas de exploración posteriores a los trabajos de campo, en la búsqueda y prospección de nuevos yacimientos minerales mediante la conceptualización e implementación de un proyecto SIG combinando y modelado a partir de la información geocientífica digital disponible en el Servicio Geológico Mexicano.

Identificar y combinar anomalías geoquímicas con la geología de la zona, estructural, datos geofísicos, imágenes de satélite, para generar áreas en las que se verifique la coincidencia de parámetros favorables para reconocer posibles zonas de interés prospectivo.

Generar el sistema de información geográfica con los temas que se irán trabajando durante los procesos, para su interpretación y análisis de la información.

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y ALCANCES DEL TRABAJO.

La combinación de una serie de datos geocientíficos como son los geológicos, geoquímicos, estructurales y geofísicos permiten mediante sus características determinar si un área geográfica puede o no tener la posibilidad de albergar mineralización y un SIG puede ayudar a definir con mayor facilidad áreas específicas de interés prospectivo y priorizarlas.

Los alcances de este trabajo permitirán la conceptualización e implementación de una metodología de exploración minera como proyecto SIG y la modelación de objetos geológicos puede ser aplicada a cualquier investigación geológica, independientemente de la tecnología o software SIG a utilizar y del enfoque (vectorial o raster) que se dé al mismo, dando un enfoque guía como aplicación para el procesamiento de la información a analizar.

I.4. METODOLOGÍA.

Para lograr que este trabajo cumpla con los tiempos establecidos y de manera satisfactoria se programaron las siguientes etapas de estudio:

Recopilación de la información relacionada al área de estudio que será integrada en la aplicación. Dicha información se obtuvo en bibliotecas, información del Servicio Geológico Mexicano y de otras Instituciones como por ejemplo: La Sección de Posgraduado de la Universidad Autónoma de Chapingo, Comisión Nacional del Agua, Bibliotecas, Universidades, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional, INEGI, entre otras, con objeto de contar con más y mejores elementos para su análisis.

Interpretación estadística y analítica partiendo de información geoquímica de sedimentos de arroyo activo, con lo que se pretende conocer la presencia de elementos químicos existentes en la zona, su contenido, concentración, afinidad, dispersión así como su análisis a partir de la morfología hidrográfica, lo que nos permitirá conocer y delimitar su origen a partir de las cuencas de captación.

Descripción del Marco Geológico, Estructural y Tectónico de la zona de estudio, tomando como base a la información de campo y toda aquella recabada en gabinete, así como la descripción y características geológico-mineras de zonas mineralizadas.

Elaboración del sistema de Información Geográfica para adecuar los niveles de información que servirán de base para el análisis del estudio a realizar, así como la interpretación, combinación e intersección de las diferentes capas y como herramientas auxiliares, imágenes satelitales de diferente resolución espacial, realces de las mismas por razones (ratios), combinados con modelos digitales de elevación y magnetometría para determinar niveles estructurales y delimitación de contactos geológicos principales de la zona.

Como última etapa realizar las conclusiones y el análisis final de la información del estudio y edición final de la metodología planteada.

I.5. LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO.

El área de estudio se localiza en la parte centro-este de la República Mexicana en el estado de Hidalgo, entre las cartas Actopan F14-D71 y Pachuca F14-D81, escala 1:50.000. Se ubica entre las coordenadas geográficas 20°25' Lat. Sur, 98° 55' Long. Oeste a 20°07' latitud norte y 98°40' longitud oeste, cubriendo una superficie aproximadamente 847 km² (Fig. I.1).

La vía de acceso principal a la zona de estudio es la carretera Federal 85 México-Laredo, tramo Pachuca-Actopan, con un recorrido de 28 km hasta el poblado de San José Tepenené, de aquí se transita al noreste por camino de terracería que conduce a la zona de estudio con una distancia de 4 km.

Otra de vía de acceso se puede realizar por la carretera Federal 85 México-Laredo al entronque con la carretera pavimentada al poblado de San Juan Tilcuautla, pasando por el pueblo Benito Juárez hasta llegar a Puerto Palma, de ahí se toma una terracería al noroeste a una distancia de 5 km que nos conduce al área de estudio.

Los municipios principales que se ubican en la zona son: Pachuca, Mineral del Monte, Actopan, Mineral del Chico, El Arenal, San José Tepenené y Atotonilco el Grande, dentro del mismo estado; existen otros caminos de terracería que comunican las principales cabeceras municipales, etc., así como algunas rancherías que cuentan con los principales servicios.

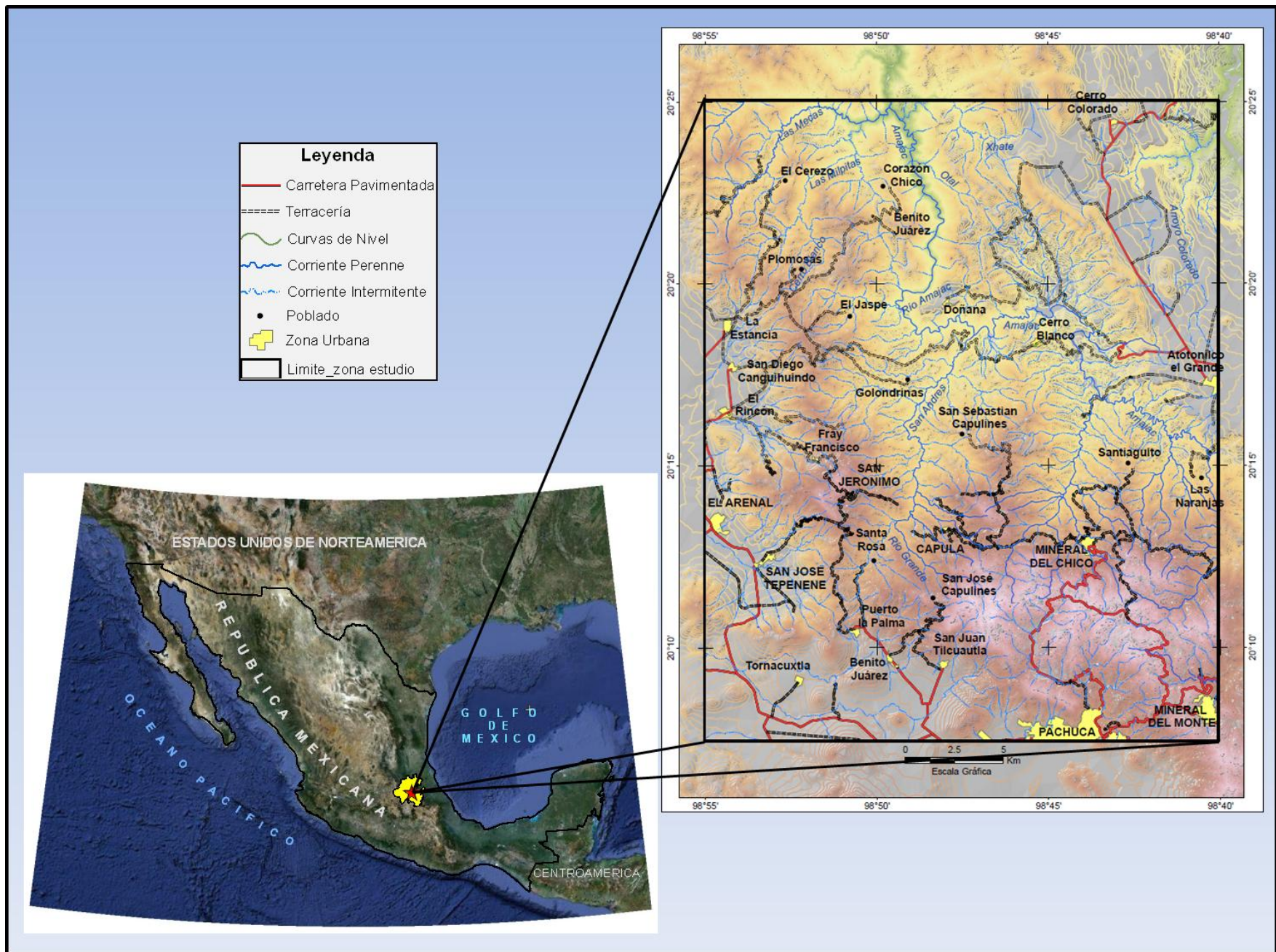


Fig. I.1. Plano de Localización del área de estudio Actopan-Pachuca.

I.6. GEOGRAFÍA Y ASPECTOS GENERALES.

La zona de estudio queda comprendida dentro del estado de Hidalgo que forma parte de la zona centro del país, contando con una superficie estatal de 20.905,12 km² (representa el 1,1% del territorio nacional) lo que le permite ocupar el lugar 28 en extensión territorial dentro de la República Mexicana. Este estado se localiza entre los paralelos: 19°35'52" y 21°25'00" de latitud norte y entre los meridianos: 97°57'27" y 99°51'51" de longitud al oeste de Greenwich, con altitudes que varían entre los 2.400 y 3.600 metros sobre el nivel del mar. Los estados limítrofes que envuelven esta entidad son: al norte limita con el estado de San Luis Potosí, al noreste con Veracruz, al este con Puebla, al Sur con Tlaxcala y Estado de México y al oeste con Querétaro (Fig. I.2).

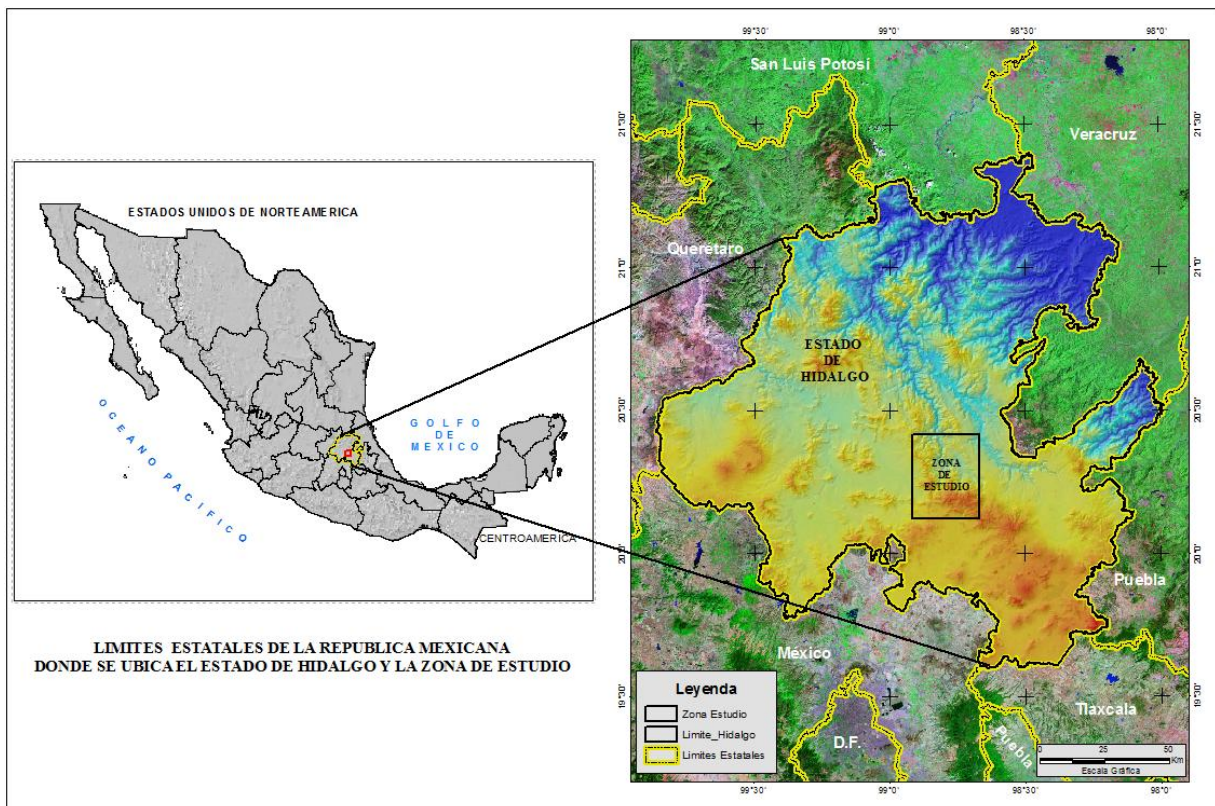


Fig. I.2. Límites estatales que delimita al estado de Hidalgo respecto a su ubicación en la República Mexicana.

Hidalgo se ha caracterizado por ser una entidad minera con un historial de 500 años de minería, ocupó el onceavo lugar a nivel nacional (en el 2009) en la producción de minerales metálicos con el 1,99% en valor; en oro ocupa el 18º lugar, en plata el 14º, en cobre el 10º (décimo), en manganeso el primer lugar, en plomo el 10º y con zinc ocupó el 9º; todos estos a nivel nacional. Igualmente se ha destacado por su producción de minerales no metálicos,

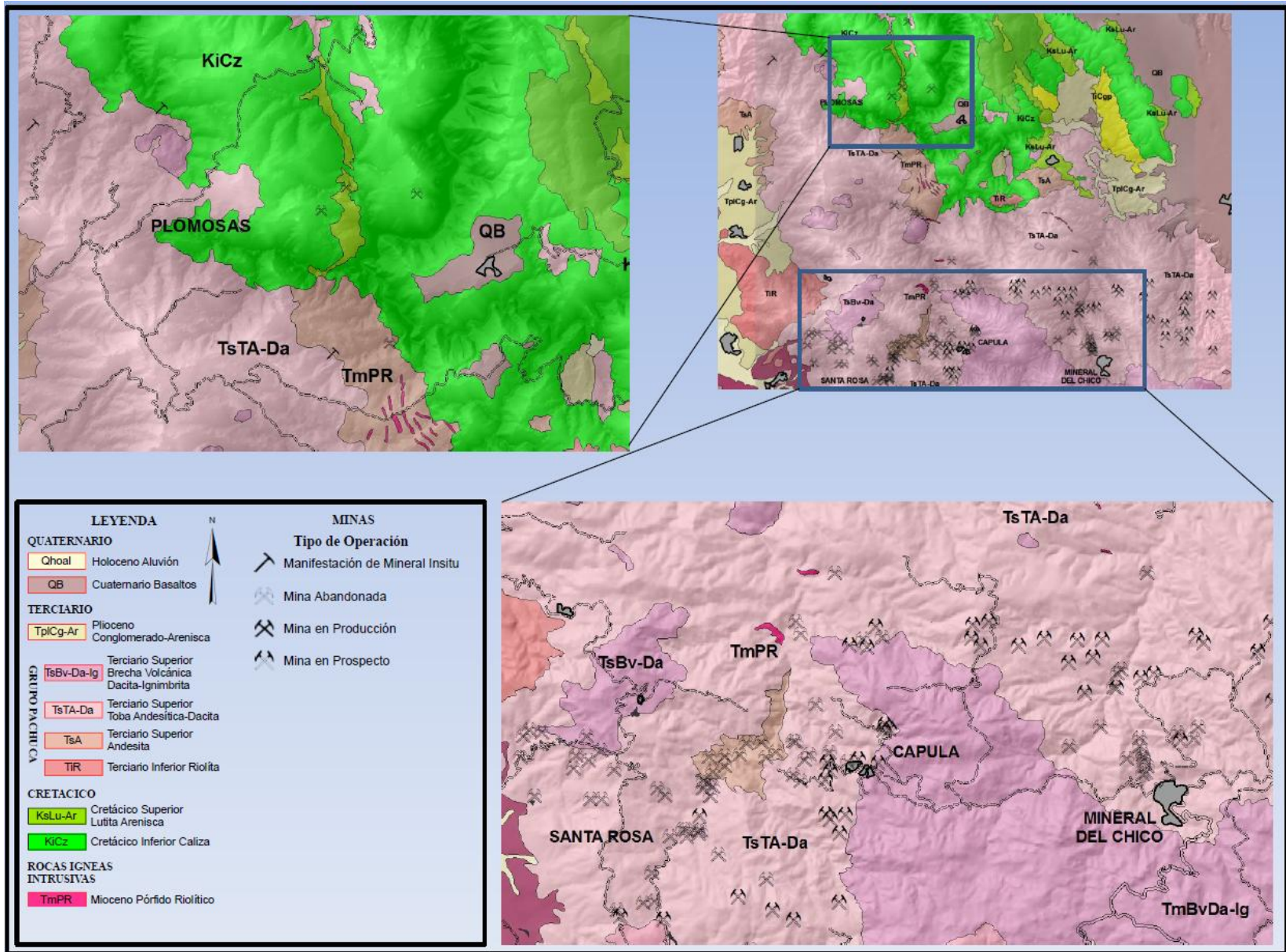


Fig. I.3. Localización de las áreas Plomosas, Santa Rosa, Capula y Mineral del Chico de la Comarca Minera.

en agregados pétreos (material para construcción) el 25° (veinticinco) lugar, en arcillas 4°, cantera y yeso el 6°, en arena 4° y grava (material para construcción) el 2° (segundo), en azufre 6°, caliza 4° y tezontle el 3°, el caolín 2° y tepetate en 4° y calcita el 2°. (Fuente. Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada 2010, SGM).

Existen 10 regiones geográficas en todo el estado de Hidalgo, en el cual el área de estudio se encuentra ubicada en dos de ellas: La Comarca Minera y La región del Valle del Mezquital.

La **Comarca Minera** llamada así por su zona rica en yacimientos metálicos, siendo los más abundantes: Ag, Au y Pb y la principal ciudad donde se desarrolló esta zona fue Pachuca capital del estado de Hidalgo. También se caracteriza por presentar zonas montañosas como la Sierra de Pachuca en una dirección NW-SE, que limita a la Sierra Madre Oriental, que va desde el poblado de Tulancingo hasta Actopan.

Continuando hacia el sur y el este por las montañas que llegan a Actopan, se ubica la zona minera que ocupan el Chico, Santa Rosa, Capula y Plomosas (Fig. 1.3), con un lineamiento principal este-oeste. Hacia la parte sur incluye las laderas que bajan a la Ciudad de Pachuca, quedando esta última como límite entre la Comarca Minera y la Cuenca de México.

La otra región, llamada Valle del Mezquital, se presenta al oeste de la zona de estudio que gracias a su sistema de riego tiene una destacada producción agrícola. Produce minerales no metálicos para la producción de cemento y agregados pétreos así como la fabricación de telas y la refinación de petróleo crudo por parte de la Refinería Miguel Hidalgo que se ubica en el municipio de Tula, Hidalgo. Las ciudades más cercanas a la zona de estudio de este valle son: Actopan, El Arenal y San José Tepenené.

I.7. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

I.7.1. Rasgos Fisiográficos e Hidrográficos.

Clima

En el estado de Hidalgo se pueden distinguir tres grupos principales de climas (García 1973), donde la zona de estudio se presenta:

a) El grupo de climas templados subhúmedos y semifríos subhúmedo cuya temperatura media anual oscila entre los 12 y 18°C, se ubican principalmente en las zonas de altura media (1500 a 2500 msnm), en donde la precipitación total anual varía entre 1500 y 3500 mm. Los climas

semifríos subhúmedos se localizan en las partes altas del sistema Volcánico Transversal (SVT) principalmente en la región de Mineral del Chico y Real del Monte, donde la precipitación total anual va de los 600 a los 1500 mm.

b) El grupo de climas áridos y semiáridos comprende la porción este de la zona de hidalgo principalmente en el llamado valle del Mezquital, en la parte NE de la zona de estudio rumbo a Meztitlán. La temperatura media anual oscila entre los 12 y 22°C, y la precipitación total anual entre los 300 y 600 mm (Fig. I.4).

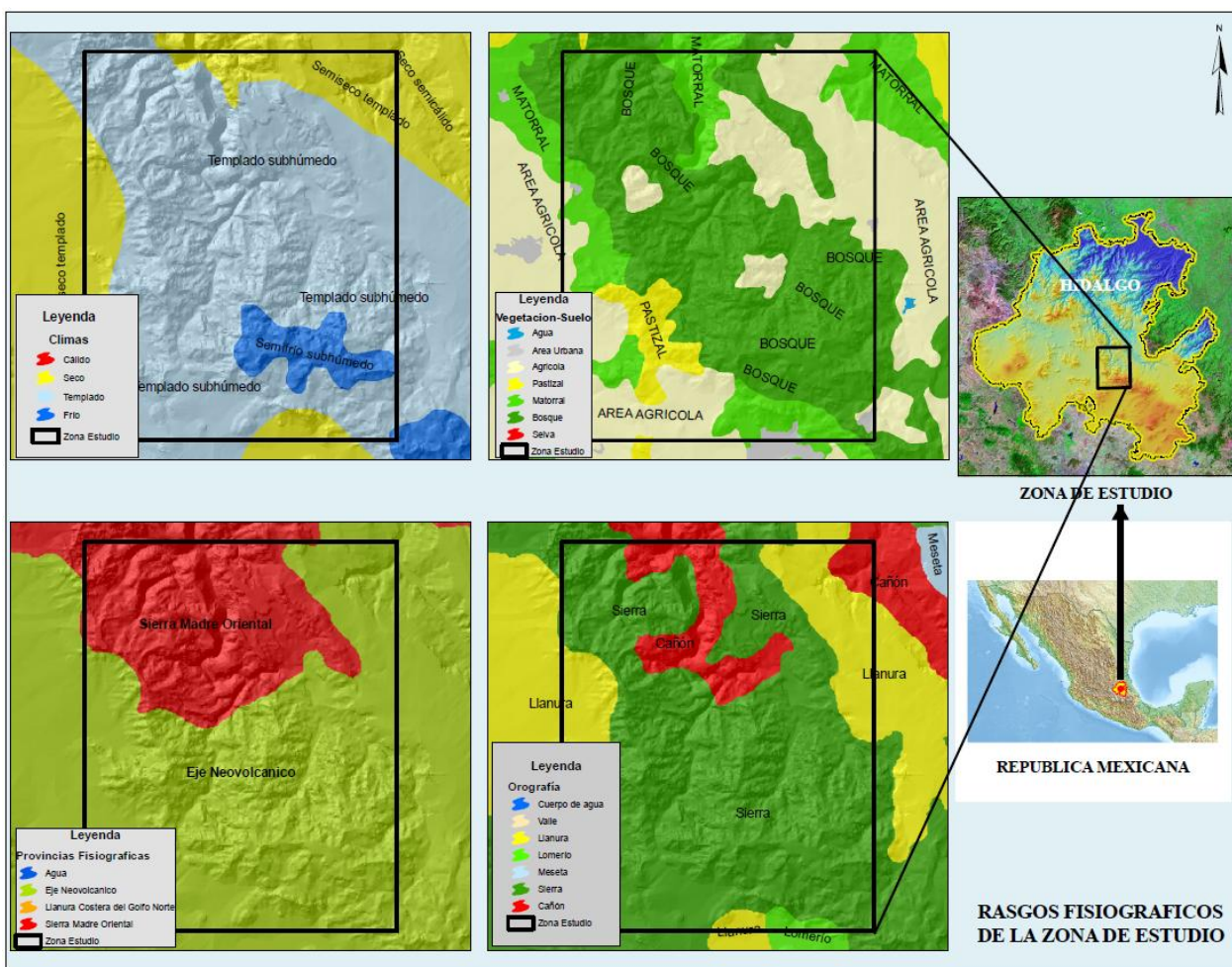


Fig. I.4. Rasgos Fisiográficos presentes en la zona de estudio.

En términos generales se pueden distinguir cuatro temporadas climáticas en la zona de estudio. La temporada fría-seca (diciembre-marzo), la seca-cálida (marzo-mayo), la húmeda cálida (junio-septiembre) y la húmeda fría (octubre-noviembre). Esta zona es característica de temporada de vientos fríos que generalmente ocurre en el mes de febrero.

Debido a la accidentada topografía presente en esta zona, existen variaciones climatológicas aun en regiones relativamente próximas entre sí. La Sierra Madre Oriental desempeña un importante papel en la distribución de los diferentes climas del estado principalmente en la zona de estudio, tanto por los efectos de la altitud como una barrera a los vientos húmedos del Golfo de México.

Vegetación

El Estado presenta cinco tipos característicos de vegetación: *selva*, *bosque*, *matorral*, *cultivo* y *pastizal*, predominando en el área de estudio la vegetación de tipo bosque, matorral, pastizal y áreas agrícolas que se localiza en la región conocida como Sierra Madre Oriental en la Sierra de Pachuca. Los diferentes tipos de bosques que se presentan son pino y encino al este y noreste de Pachuca y *áreas de cultivo* que predominan en el sur y oeste del área estudiada, principalmente en el valle de Actopan (Fig. I.4).

Fisiografía.

De acuerdo a la clasificación fisiográfica (Raisz, 1964), la zona de estudio queda comprendida en el extremo norte del Eje Neovolcánico Transmexicano y sur del Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, que a la vez está subdividida por las sub-provincias del Karst Huasteco; Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, respectivamente (Fig. I.5). Sin embargo, en forma más local la carta presenta dos tipos de campos volcánicos divididos por un valle intermontano que une la cuenca de México al sur oriente de la carta y el valle de Actopan en el noroccidente. En el vértice nororiental de la zona se aprecian campos volcánicos terciarios asociados.

Orografía

El dominio volcánico es la parte sur y los extremos oriente-poniente, en donde los rumbos de las sierras son disarmónicos con las rocas sedimentarias a las que se supone están cubriendo; las rocas volcánicas constituyen las elevaciones más predominantes del área 3.120 m.s.n.m Cerro Alto (Grande), representadas por los siguientes rasgos orográficos:

La Peña del Zumate (3049 msnm) al norte de Real del Monte, y las famosas Peña del Águila (3049 m.s.n.m.)Peñas del Cuervo (2700 m.s.n.m.) y del Gallo (2952 m.s.n.m.) así como la Peña Las Monjas (2860 m.s.n.m.), Cerro El Consuelo (3040 m.s.n.m.) y Las Ventanas (3090 m.s.n.m.) en el poblado del Mineral del Chico. Igualmente llama la atención sobre estas cumbres volcánicas el Cerro de los Frailes en la Sierra de Pachuca-Actopan con una elevación de 2870 m.s.n.m. y la Peña del Conejo (2850 m.s.n.m.) Fig. I.6.

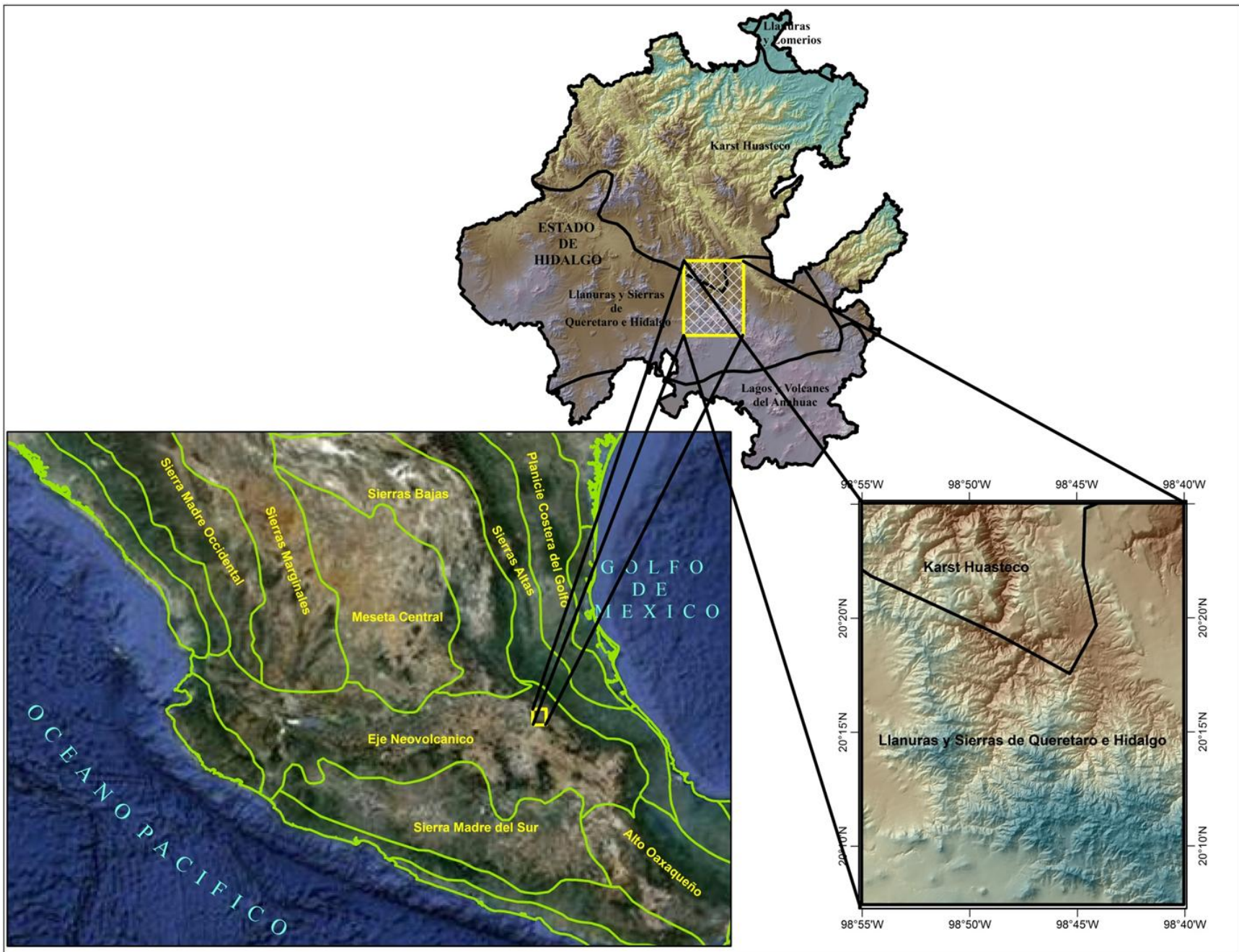


Fig. I.5. Provincias y Sub-Provincias de la zona de estudio

Las alturas más bajas de la zona de estudio se localizan en el extremo noroccidental de la carta, siendo ésta el valle de Actopan, el cual se ubican cotas por debajo de los 2.000 m s.n.m., las alturas medias se localizan en parte sur del poblado de Cerro Blanco, mientras que la partes mas altas se encuentran en la Sierra de Pachuca como se muestra en la Fig. I.6.

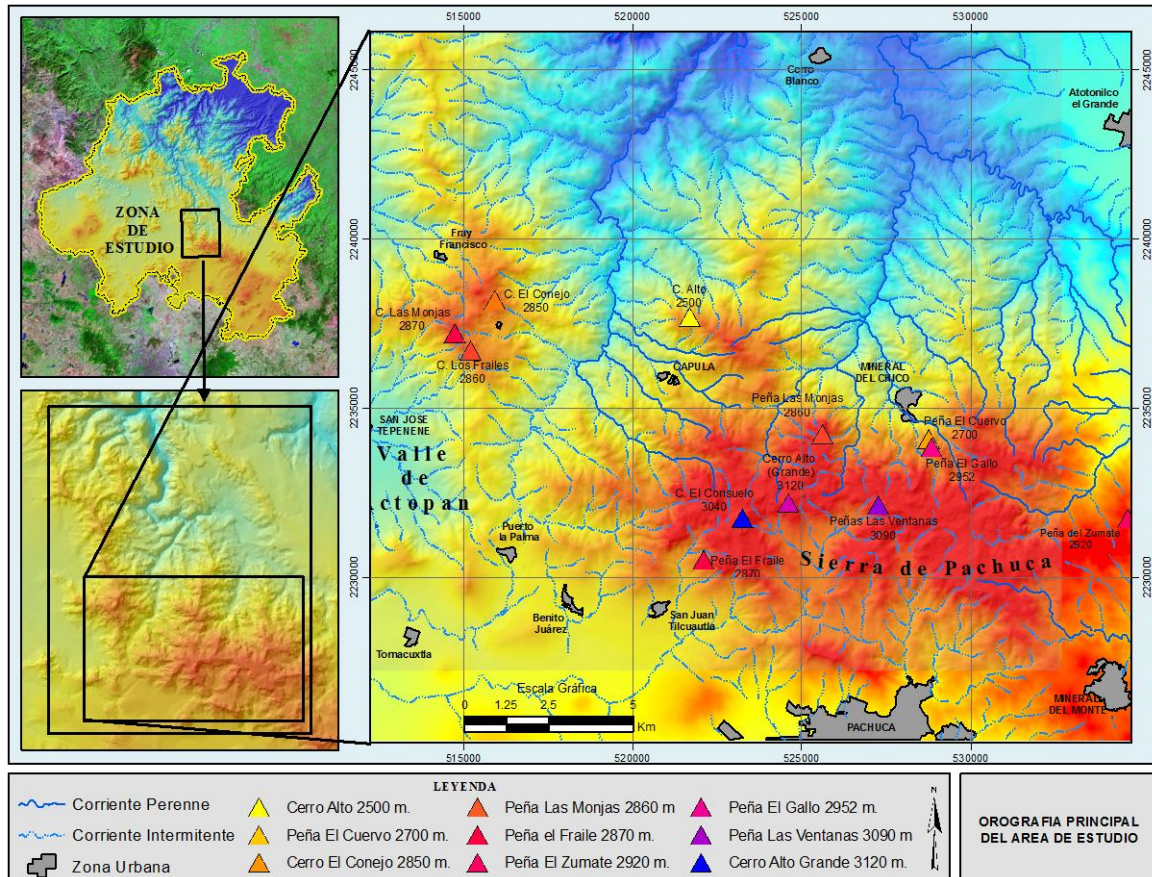


Fig. I.6. Orografía de las áreas con mayor altitud en la zona de estudio.

El Eje Neovolcánico donde se ubica el área de estudio, es una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos acumuladas durante innumerables eventos volcánicos, que corresponde a una región volcánica de los periodos Terciario y Cuaternario. Como se mencionó, se presenta como evento geológico muy importante, cruzando el territorio nacional de poniente a oriente, la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" (Fig. I.7) esta integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyatl (Malinche) y el Citlaltépetl (Pico de Orizaba).

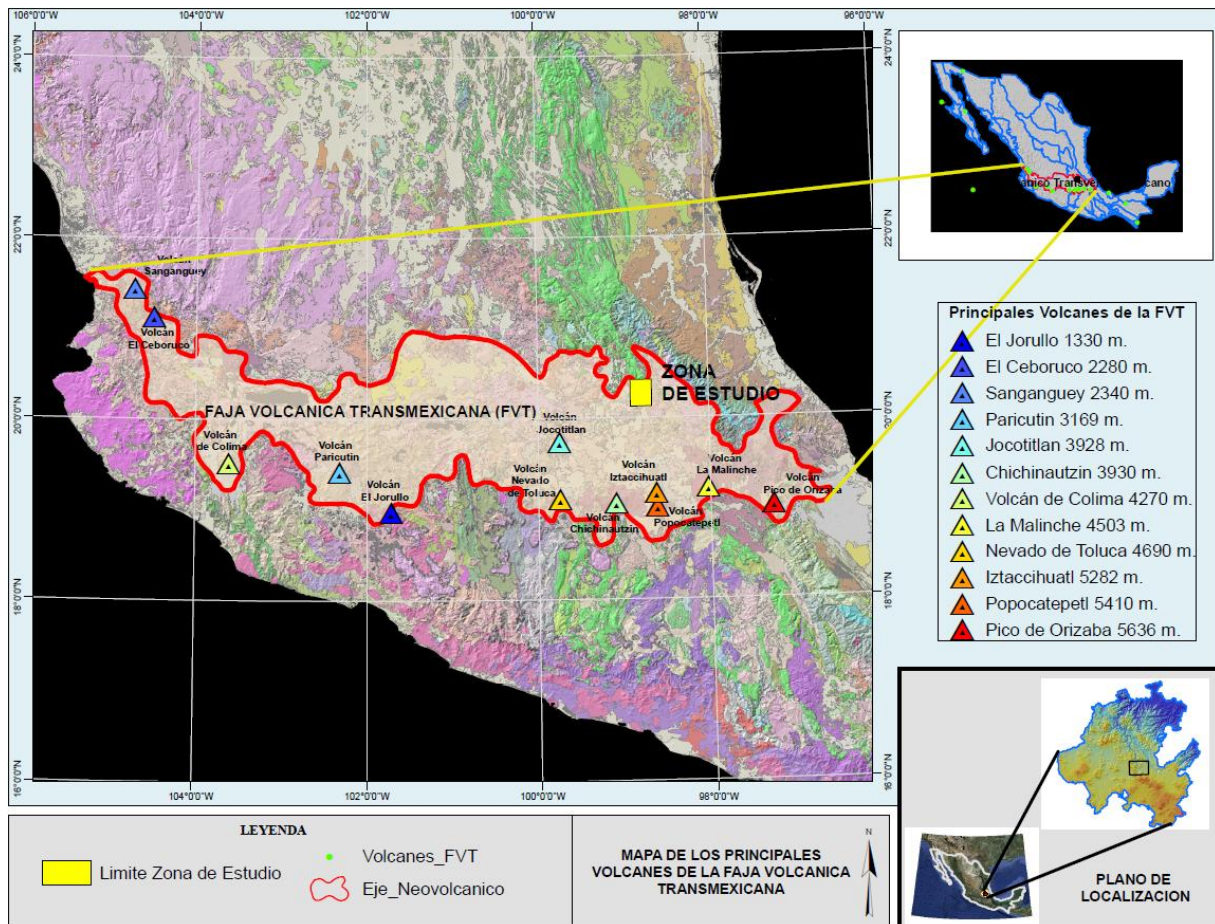


Fig. I.7. Principales Volcanes del Eje Neovolcánico de México.

Como resumen de estos rasgos fisiográficos, se puede deducir que la importancia de estas características físicas son trascendentales para determinar el transporte y origen de los sedimentos, tomando en cuenta las altitudes de la zona de ubicación así como las pendientes de la misma donde la vegetación y los suelos son indispensables en el transcurso de los metales donde la precipitación fluvial juega un papel importante y el drenaje de la zona es indispensable para el flujo de todos estos elementos.

Hidrografía.

Hidrográficamente el estado de Hidalgo esta caracterizada por la presencia de seis principales cuencas hidrológicas. La zona de estudio se encuentra en una de ellas llamada cuenca del río Moctezuma, que a su vez se subdivide en sub-cuencas y micro-cuencas

hidrológicas que conforman la red hidrológica de la zona como se muestra en la Fig. I.8.y Tabla I.1.

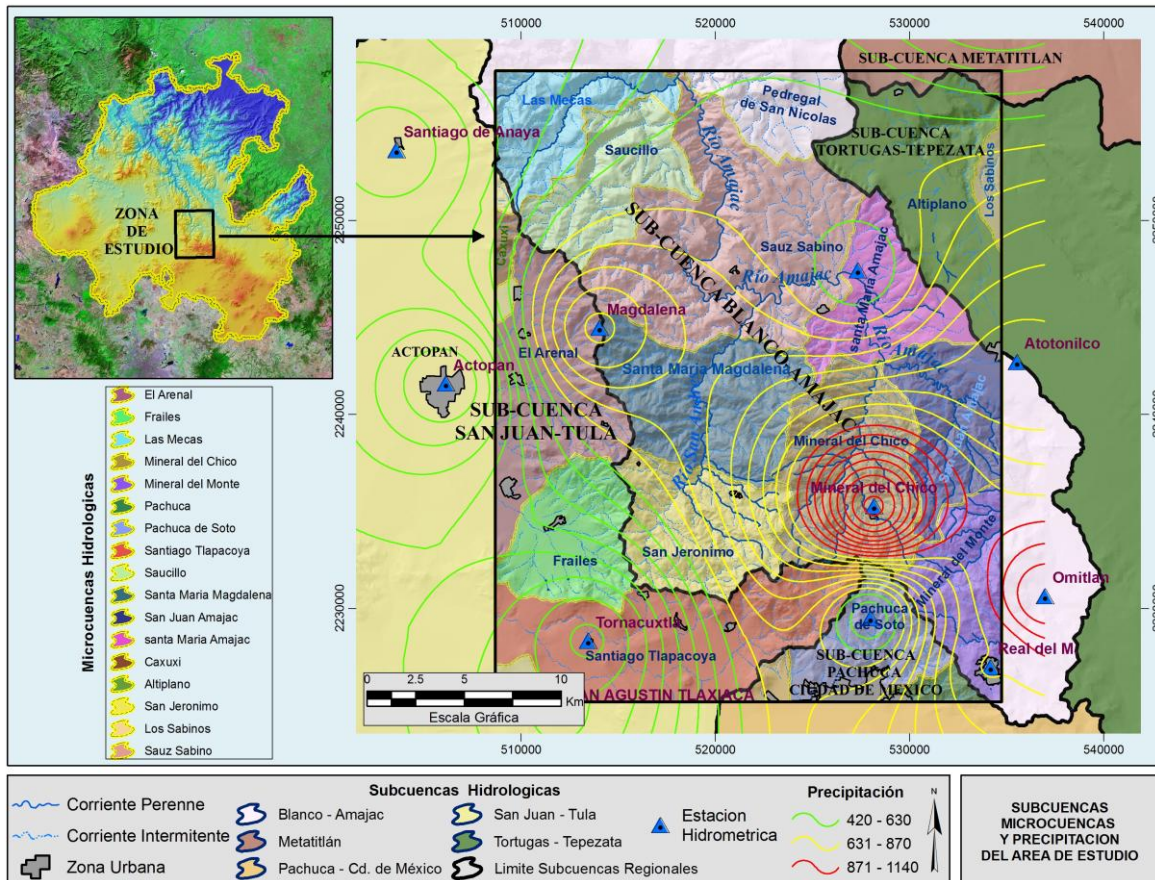


Fig. I.8. Sub-cuencas y Micro-cuencas con la precipitación media anual tomada en base a estaciones hidrométricas de la zona de estudio Fuente: CNA-2000.

Los ríos principales de la entidad corren en dirección suroeste-noreste, o bien sur a norte, en donde existen áreas pertenecientes a la Cuenca de México, con diferentes características de precipitación y escurrimiento, los principales ríos son el Amajac y San Andrés, todos ellos confluyen y drenan finalmente hacia el Golfo de México. Estas aguas superficiales son tributarios de la cuenca Amajac que cubre la mayor parte de la zona de estudio, sus parte aguas se extienden en dirección NW-SE que cubren aproximadamente 47 km lineales manteniendo alturas decrecientes que inicia en la Sierra de Pachuca con una altura máxima

estudio fue calculado en base a estaciones hidrométricas y se encuentran en 632 milímetros y la temperatura media anual de la zona de estudio se encuentra en 16° C. (Tabla I.2).

Como conclusión podemos decir que la Sierra de Pachuca forma el límite nororiental de la cuenca del valle de México, un área con piso relativamente alto y con desagüe interior o de régimen endorreico, caracterizado por la continua acumulación de detritos desde comienzos del pleistoceno hasta la fecha que se extiende al sur de la zona de estudio: El escurrimiento superficial en el flanco de la sierra del lado de Real del Monte se dirige al NW para formar el Río Amajac, un afluente principal del gran río Moctezuma que se entronca más al norte de la zona de estudio para seguir su camino y unirse al norte con el Río Pánuco que desemboca al Golfo de México

Estas características hidrométricas en cierta manera juegan un papel importante en la exploración minera por sus múltiples particularidades de exportación, filtración y acumulación de sedimentos.

CAPITULO II

PRESENTACION DE LOS DATOS

II.1. Marco Geológico

II.1.1. Litología.

El marco geológico de la zona está definido por una sucesión de eventos volcánicos cenozoicos, donde se identifican la Provincia Alcalina Oriental o Eje Neovolcánico Transmexicano, mientras que el vértice suroccidental presenta campos volcánicos más recientes y claramente originados por la Faja Neovolcánica. Su formación es de origen ígneo, extrusivo formado en el Oligoceno-Mioceno y probablemente Pleistoceno (~25 a 5 Ma) Geyne et al., (1963).

En la zona de estudio afloran tres tipos de litologías, las que a su vez engloban varias formaciones mismas que se describen a continuación, cuyas edades van del Cretácico al Reciente y por orden estratigráfico se tienen: Rocas Cretácicas de origen sedimentario constituidas principalmente por calizas y lutitas, el segundo grupo son rocas volcánicas de edad Terciaria (andesitas, rolitas y basaltos) y el tercer grupo lo conforman depósitos recientes compuestos principalmente por aluvión y sedimentos no consolidados.

II.1.1.1. Sistema Cretácico.

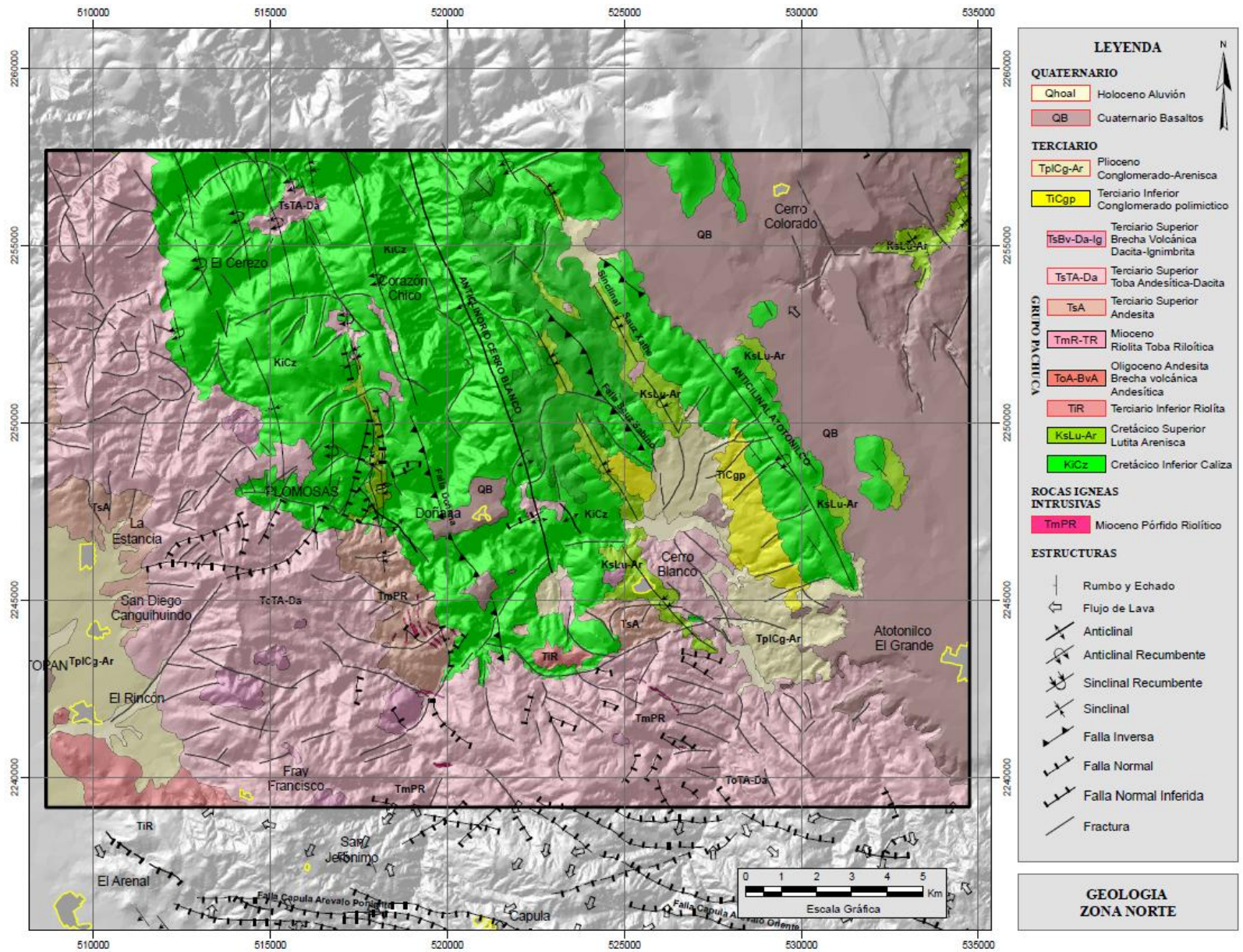
Rocas Sedimentarias

Estas rocas se ubican en la parte central y norte de la zona de estudio formando anticlinales, anticlinales recumbentes y sinclinales que en conjunto integran el denominado Anticlinorio Cerro Blanco, con un rumbo axial generalizado de N30°W y está representado por calizas del Cretácico inferior y Cretácico Superior.

Las calizas del Cretácico Inferior corresponden a la denominada Formación Doctor (Ki-Cz), la que está representada en el área estudiada por dos facies de sus cuatro facies. La llamada Facies Cerro Ladrón, formada por estratos calcáreos y ubicada en la parte norte de la zona de estudio, se presenta con estratos que van de 1 a 4 m de espesor y tienen rumbo general promedio de noroeste 30° y un buzamiento promedio de 55° al SW. Son rocas de color gris claro que contienen abundantes fósiles y es característico de esta facies su olor fétido al romperse y son fácilmente atacadas por las aguas meteóricas, produciendo zonas cársticas.

La otra facies encontrada es la llamada La Negra está ubicada en la parte oriente del anticlinal Cerro Blanco (porción suroeste). Está formada por calizas con estratificación delgada, con espesores que van de 10 hasta los 40 cm, con rumbos al noroeste 40°, buzando al suroeste con 45°. Su color varía de gris claro a gris oscuro, con lentes de pedernal negro. Estas calizas se consideran de un ambiente de depósito de nivel plataforma, mientras que las Facies del Cerro Ladrón se consideran de tipo arrecifal (Aguilera y Ordoñez, 1897)

Las rocas del Cretácico Superior se encuentran representadas por rocas de la Formación Méndez (Ks-Lu-Ar), la que se presenta en la parte NE de la zona (Fig. II.1) y está representada por lutitas y areniscas bien estratificadas, sus espesores varían de 5 a 10 cm, las cuales alternan con capas de margas y grauvacas en espesores de 15 cm. El espesor en los remanentes es de 10 a 40 m, máximo, en tanto que en la parte norte de la zona es de hasta 80 m, en las mediaciones del Río Venados.



II.1.1.2. Sistema Terciario.

Rocas Volcánicas

A mediados del Oligoceno principió un largo período volcánico originado por la tectónica de bloques fallados en extensión, dando origen a las formaciones del Grupo Pachuca, el cual culminó en el Plioceno temprano, mismo que se describe más adelante.

La zona de estudio se encuentra cubierta por rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y riolítica de edad Terciaria, las que sobreyacen en discordancia erosional al grupo descrito anteriormente como conglomerado El Morro que consiste en una sucesión clástica discontinua descrito por (Seegerstrom, *et al.*, 1963), formada principalmente por materiales erosionados del sustrato Cretácico.

Sobreyaciendo discordantemente a estas secuencias se encuentra aflorando en la zona una secuencia volcánica nombrada Grupo Pachuca, son rocas volcánicas compuestas por derrames de lava interestratificados con capas de tobas y brechas volcánicas, conglomerados volcánicos y areniscas tobáceas (Geyne, 1963), estas se encuentran representadas en la zona de estudio como Sierra de Pachuca que se extiende hasta la parte NE de la zona de estudio (Fig.II.2).

Este grupo está constituido por 8 formaciones de origen volcánico, denominadas: Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo y Zumate, compuestas por derrames de lava, brecha volcánica, conglomerado volcánico, tobas y areniscas tobáceas (Geyne, *et al.* 1963). La evidencia para tomar la edad de estas rocas consistió en la observación de impresiones de hojas fósiles en capas de arenisca tobacea y limolita de la parte de la Fm. Cerezo, enviando muestras coleccionadas a la Universidad de California para su identificación. Tomando como base la evidencia de los fósiles y de las relaciones estratigráficas, estas rocas varían en edad desde el Oligoceno medio hasta el Mioceno tardío o el Plioceno temprano.

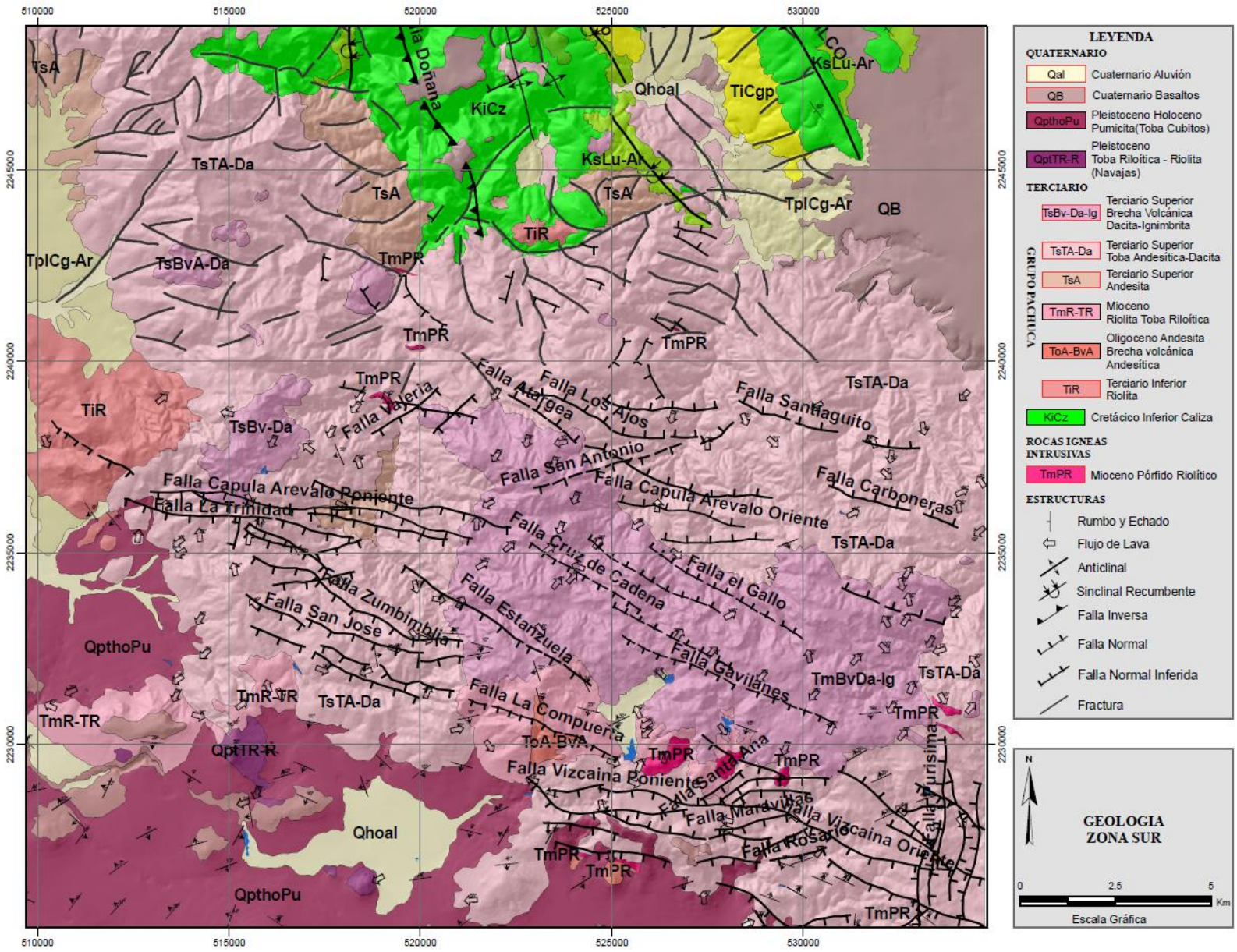


Fig.II.2. Geología de la zona volcánica situada al sur de la zona de estudio

Las rocas andesíticas ocupan una vasta extensión y son con mucho las rocas predominantes. Estas constituyen la roca huésped de las vetas de los distritos mineros más importantes de la zona como El distrito minero Pachuca, Real del Monte, El Chico, Santa Rosa, Capula y San José Tepenené, situados en la porción Centro y NW de la zona de estudio.

Las riolitas son menos abundantes y se hallan confinadas en el extremo SE y este de la Sierra de Pachuca, presentándose también aunque sin abarcar grandes superficies en la parte norte de Pachuca. Por último, los basaltos se encuentran en forma de reventazones en la parte alta de algunos cerros y bajo la forma de flujos de lava en la parte norte y NE de la Sierra de Pachuca.

La Sierra de Pachuca cuenta con bancos de brechas andesíticas, que tienen espesores superiores a 400 metros, ocupando la parte central de la cresta de la Sierra, desde las montañas de Capula al oeste del Mineral del Chico, hasta las Peñas de Zumate en Real del Monte, donde la Sierra forma caprichosos picos a consecuencia del desigual trabajo de erosión sobre estas grandes masas con grandes acantilados como Las Monjas, Ventanas del Chico, y Peña del Zumate, etc., que son restos de un prolongado espinazo o cuchilla de más de 10 kilómetros de longitud y de 5 kilómetros de potencia, desgastado e interrumpido por las acciones de denudación. (Aguilar, 1897).

II.1.1.3. Cuaternario.

A finales del Plioceno continuó el vulcanismo máfico y, por consiguiente, la interrupción del desagüe en muchos lugares, produciendo lagos pequeños y lagunillas en donde se depositaron los sedimentos lacustres de la Formación Tarango; después, estos lagos fueron desaguados y las corrientes fluviales dieron lugar a los sedimentos del Cuaternario, es decir, al aluvión.

Las rocas eruptivas más recientes de la Sierra de Pachuca son los basaltos que aparecen en varios lugares, generalmente bajo la forma de pequeñas corrientes, en puntos bastantes elevados con relación a los valles que rodean a la Sierra en mención. Estos basaltos se presentan en la parte NE de la Sierra de Pachuca y se extienden por la meseta de Atotonilco el Grande (Fig.II.1), variando en sus espesores en los cuales algunos alcanzan 100 metros.

Se constituyen por columnas generalmente verticales, algunas veces inclinadas y también dispuestas en grupos radiados o en abanico que se apoyan sobre basaltos más cristalinos y otros sobre basaltos areniscos o tezontle coronados por basalto compacto, mostrando frecuentemente la estructura de escurrimiento. Las columnas basálticas son generalmente de sección pentagonal y de diámetros variados entre 40 y 80 centímetros y en sus oquedades se encuentran algunas veces zeolitas bien cristalizadas y rodeadas de olivino.

Los depósitos Aluviales depositados en abanicos aluviales cubren la parte Sur y suroccidental de la zona de estudio con laderas arriba de los flancos de los cerros y sierras limítrofes. Los depósitos varían desde masivos a bien estratificados y son de colores gris amarillento, impregnados con caliche gris claro. En las tierras bajas y casi planas están constituidos por gran parte de partículas del tamaño de la arena, el limo y la arcilla y en los abanicos aluviales y al pie de las sierras se forman gravas.

Existen también depósitos de talud y de derrumbe, producidos por el desgajamiento de lavas dacíticas de la Fm. Zumate en bloques de talud cubriendo tobas menos resistentes que se presentan en la base de la unidad y por derrames andesíticos de la formación Vizcaína (TsTA-Da) en las partes noroccidental y septentrional de la zona de estudio.

II.1.1.4. Rocas Intrusivas.

Las rocas intrusivas de edad terciaria tardía son comunes y se encuentran distribuidas ampliamente en la zona de estudio. Consisten en numerosos diques y cuerpos irregulares, que en la superficie varían en longitud desde unos cuantos cientos de metros hasta unos 4 km y en anchura desde unos pocos metros hasta más de 100 m. Alguno de los diques tienen de 10 a 14 km de largo y en niveles inferiores pueden tener aun mayor longitud (Segerstrom *et al.*, 1963). Es probable que estos cuerpos al tomar la forma de abanico se convirtieran en derrames de lavas al llegar a la superficie y formaran las partes superiores, ahora erosionadas, de algunas de las formaciones volcánicas terciarias. Los diques son de edad variable y un tipo u otro de ellos atraviesa a todas las formaciones litológicas terciarias de la zona, hasta la formación Zumate (TsBv-Da).

Las rocas intrusivas de la zona están divididas en seis grupos, de acuerdo con sus edades relativas y de la más antigua a la más reciente son: Pórfido de dacita hornbléndica, pórfido

de cuarcífero de grano fino, pórfido cuarcífero de grano grueso, pórfido de dacita biotítica, félsica y andesita de olivino.

En orden de importancia, describiremos el pórfido que más está relacionado con la mineralización de la zona de estudio, aunque los demás son de importancia, daremos más énfasis al pórfido mencionado.

PÓRFIDO CUARCÍFERO DE GRANO FINO

Las rocas de este cuerpo intrusivo son las principales en el distrito Pachuca, ya que afloran aproximadamente 90 cuerpos intrusivos en la superficie. Estos intrusivos cruzan a las rocas de la Fm. Cerezo, su edad corresponde al final del tiempo Cerezo o al tiempo post-Cerezo. Sin embargo, es de edad pre-mineral y pre-Zumate, ya que está cortado por las vetas y no atraviesa a la Fm. Zumate. Los diques y los cuerpos intrusivos en forma de embudo, compuestos de pórfido cuarcífero de grano fino, cortan a la Fm. Cerezo y a las unidades descritas anteriormente. Cabe mencionar que de igual manera cortan al grupo rocas intrusivas compuestas de pórfido de dacita hornbléndica.

El emplazamiento del pórfido cuarcífero de grano fino estuvo confinado a un solo periodo relativamente corto de intrusión, casi contemporáneo con la mineralización por lo que se le asigna una edad Mioceno Inferior – en base a datación K-Ar en adularia hidrotermal de 20.3 ± 0.5 Ma. (McKee et al., 1992).

Diques de pórfido cuarcífero de grano fino están cortados por diques de pórfido cuarcífero de grano grueso y parece que están cubiertos discordantemente por la Fm. Tezuantla. De igual manera están cortados por vetas mineralizadas.

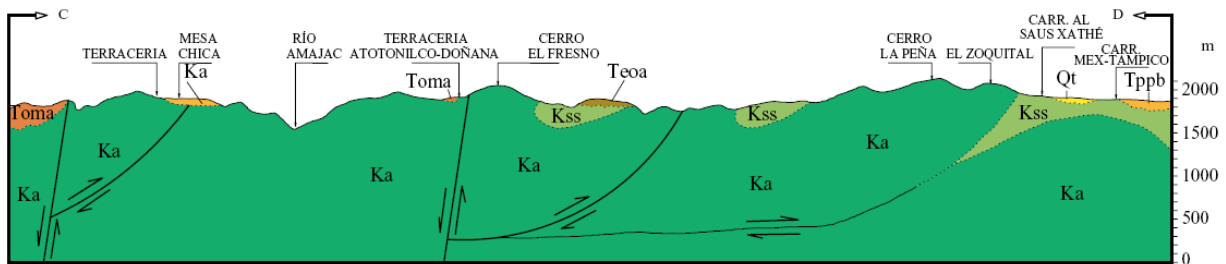
La importancia de estos cuerpos, en especial la de los cuarcíferos de grano fino, es fundamental para la prospección minera metálica en esta región, ya que el emplazamiento de los diques va estrechamente ligado al de las estructuras vetiformes, ya sea de relleno de fisura al alto bajo ó dentro del dique ó por relleno de brechas de intrusión de los mismos diques. Por lo tanto la ocurrencia de estos diques son elementos que deben ser considerados como fundamentales para la definir áreas prospectivas.

II.2. ESTRUCTURAS

La zona de estudio se caracteriza por una serie de estructuras geológicas como fallas, anticlinales, sinclinales, fracturas y fallas inversas con orientación NW-SE, tales como el Anticlinorio Cerro Blanco que se observa en la parte NE de la zona de estudio.

La deformación es producto de la fase compresiva Laramide ocurrida entre el Cretácico Tardío y el Eoceno Temprano que afectó a las formaciones Cretácicas, formando pliegues cuyas charnelas tienen un rumbo noroeste y que son ya sea simétricos o recumbentes con vergencia al noreste.

En la figura II.3 y sección II.1, se ilustra la deformación causada por dicho evento en las rocas sedimentarias marinas, con estructuras plegadas recostadas hacia el oriente y a fallamiento inverso (Arellano-Gil *et al*, 2005), sobresaliendo los anticlinales Atotonilco, Tliltepec y Doñana, los sinclinales Sauz Sabino y Sauz Xatle, así como las fallas inversas Doñana y Sauz Sabino.



Sección II.1. Sección Geológica donde se indica la ubicación estratigráfica de la zona NE de la zona de estudio (Arellano-Gil *et al*, 2005)

Toda la información geológico-estructural obtenida, permite interpretar la evolución tectónica estructural del área la cual corresponde a una estribación de la Sierra Madre Oriental, constituida por rocas mesozoicas de predominio calcáreo hacia el norte y el límite del Eje Neovolcánico, representado por una enorme masa de rocas volcánicas hacia el sur de la zona de estudio. Tectónicamente la región pasó de una fase compresiva de plegamiento (Laramide) hasta una extensional de fracturamiento y fallamiento normal (post-Laramide).

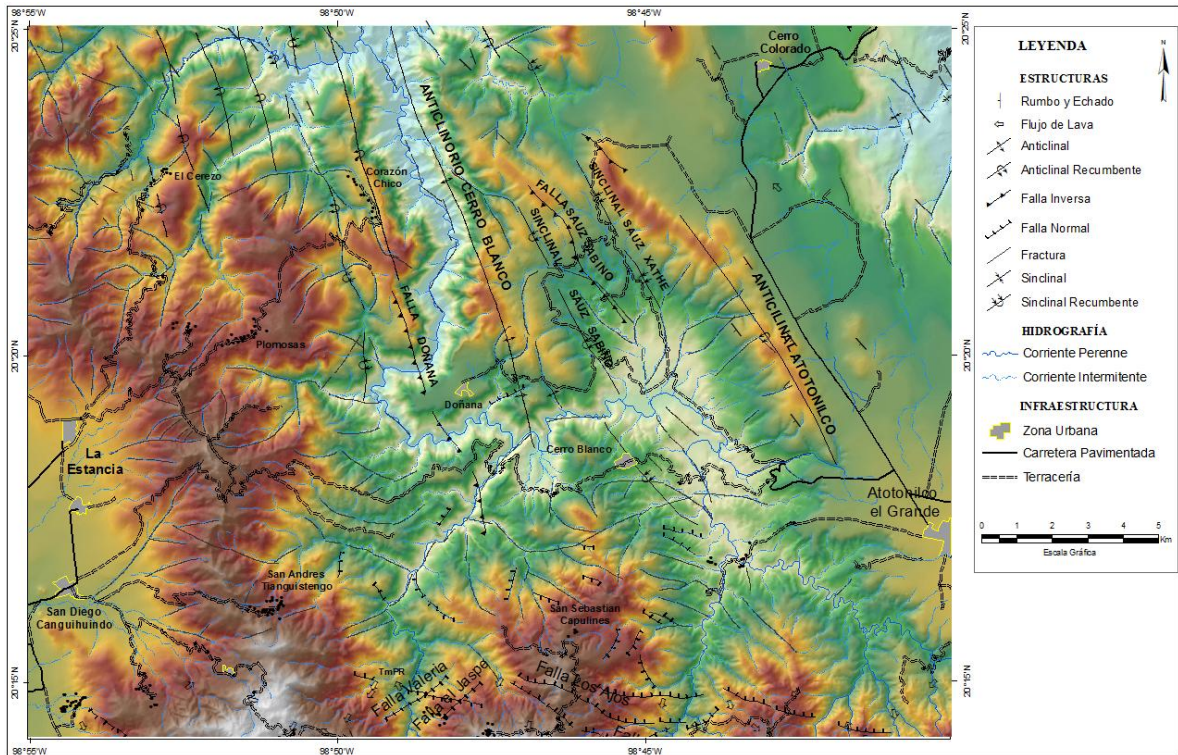


Fig. II. 3. Estructuras de la Zona Norte Actopan.

En la parte sur de la zona de estudio, dominan los afloramientos de las rocas volcánicas de la Fm. Vizcaína (TsTA-Da) y en segundo término las rocas de la Fm. Zumate (TsBvDa-Ig), en la que se observa un fracturamiento principal de predominio oriente-poniente y tiende al noroeste (Fig.II.4). Existe también un segundo lineamiento de rumbo NW-SE y un tercer lineamiento de rumbo casi norte sur en la parte sur-este de la zona de estudio. Son fallas de tipo normal con frecuentes componentes laterales que presentan diferentes orientaciones e inclinaciones variables. (Carta Geológico-Minera Pachuca, 2005).

El primer sistema estructural y más importante es el de rumbo preferencial NW-SE representado por las fallas Capula-Arévalo, Estanzuela y Vizcaína (Fig.II.5), entre las más grandes, a este sistema se asocian las principales estructuras mineralizadas.

Dicha estructura se encuentra afectada por fallas que cortan a la estructura casi perpendicularmente a su rumbo provocando movimientos verticales, quedando integrada por un sistema de bloques (Horsts y Grabens), que originaron que a un mismo nivel topográfico correspondan niveles diferentes de mineralización.

Estos niveles topográficos, aunados con las evidencias superficiales, nos hacen suponer que existen bloques separados por fallas con rumbo N-S, que han originado desplazamientos verticales en las zonas mineralizadas como el área del Mineral de El Chico, que fue desplazada hacia abajo, con respecto a la zona occidente de Capula.

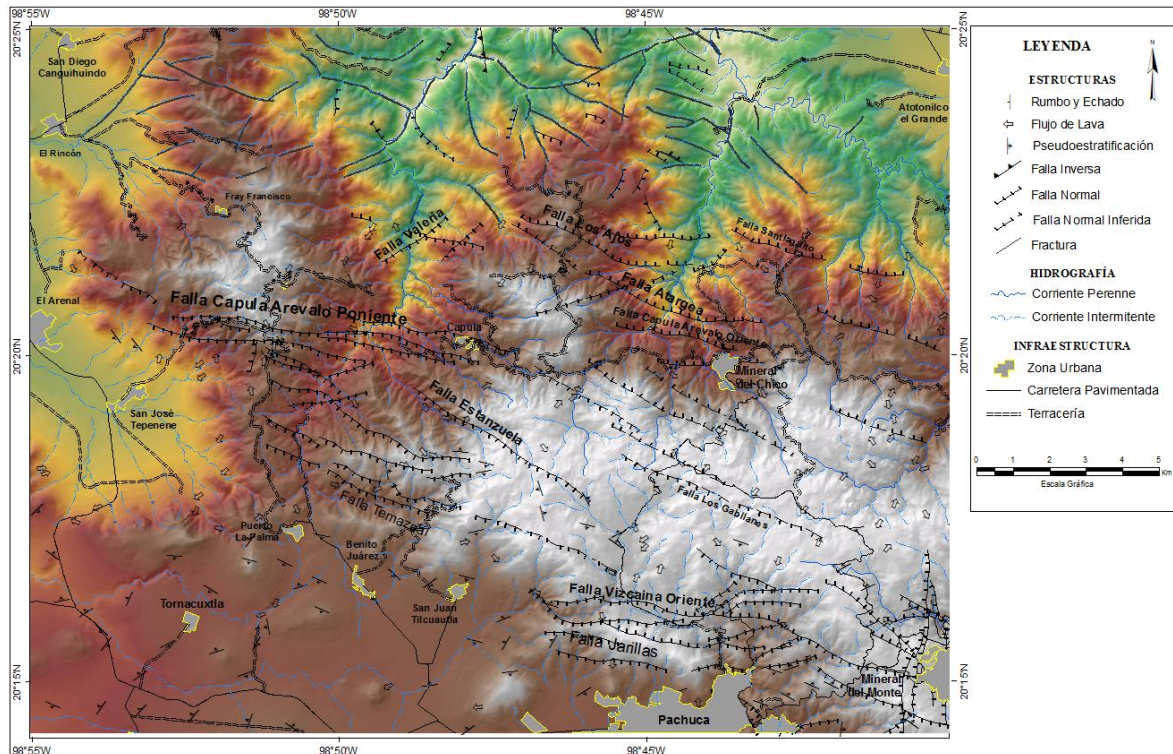


Fig. II. 4. Estructuras principales de la zona sur de estudio (Pachuca)

Así mismo, es posible que también haya movimientos de rumbo y echado de un bloque que estaría limitado al oriente y al occidente por fallas localizadas en los contactos de la Fm. Zumate (TsBv-Da) con el grupo Pachuca. Esto nos indica que efectivamente ciertos bloques estructurales presentan cuerpos o zonas mineralizadas y constituyen elementos básicos para definir áreas como fue el caso del Mineral del Chico, respecto a la zona de Capula. (Lee. *et al*, 1974).

En la foto II.1 se muestra un panorama general de la zona de estudio a nivel regional, donde se muestra algunas características estructurales de la Formación Zumate (TsBvDa-Ig), que forma parte del sistema estructural de un bloque hundido (Graben), que se desplazó hacia el norte ocultando toda evidencia superficial de mineralización. Esta fue provocada por una falla

normal que la atraviesa con un rumbo oriente-poniente, que además origino el cubrimiento y desviación hacia el NW del dique Arévalo-Capula (Lee *et al* 1974).

El truncamiento de estos sistemas ocurrido al Norte de nuestra área de estudio en donde las orientaciones estructurales son prácticamente Oriente-Poniente, son caracterizadas por una gran cantidad de estructuras semicirculares y dómicas que corresponden a posibles calderas y conos volcánicos.

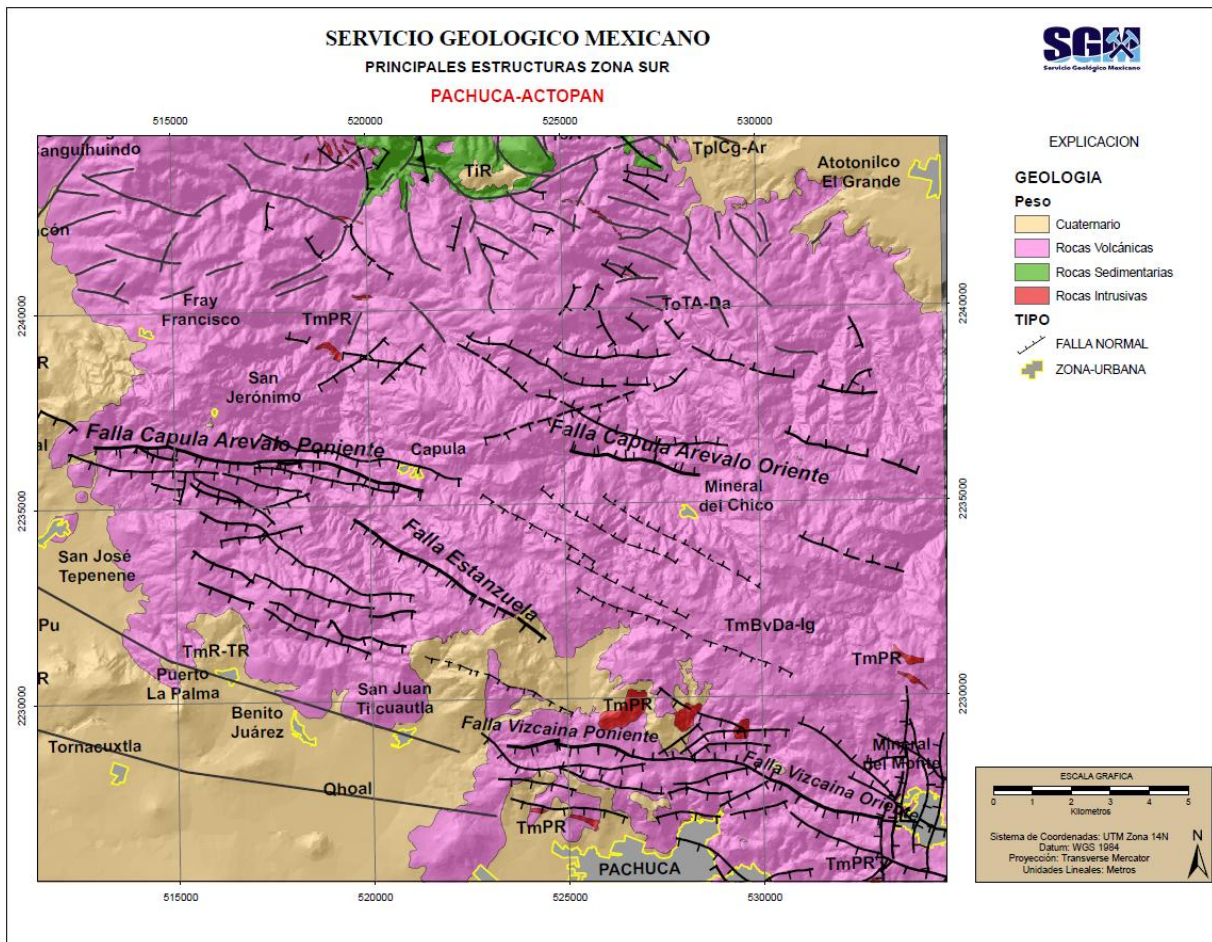


Fig. II.5. Principales estructuras relacionadas con la mineralización de la zona sur de estudio.

Concluyendo se puede decir que la Orogenia Laramide fue la causante de la formación de estructuras mayores, como el anticlinorio Cerro Blanco y las estructuras menores sobrepuestas, como anticlinales y sinclinales; una vez que ceso este evento durante la etapa de distensión, ocurrieron fallas y fracturas paralelas a las grandes estructuras; posteriormente vino una etapa de vulcanismo intensa; que debido al gran espesor, colapsó

las zonas comprimidas, dejando como resultado zonas intensamente fracturadas; lineamientos y curvilineamientos; ampliamente favorables para mineralizarse.

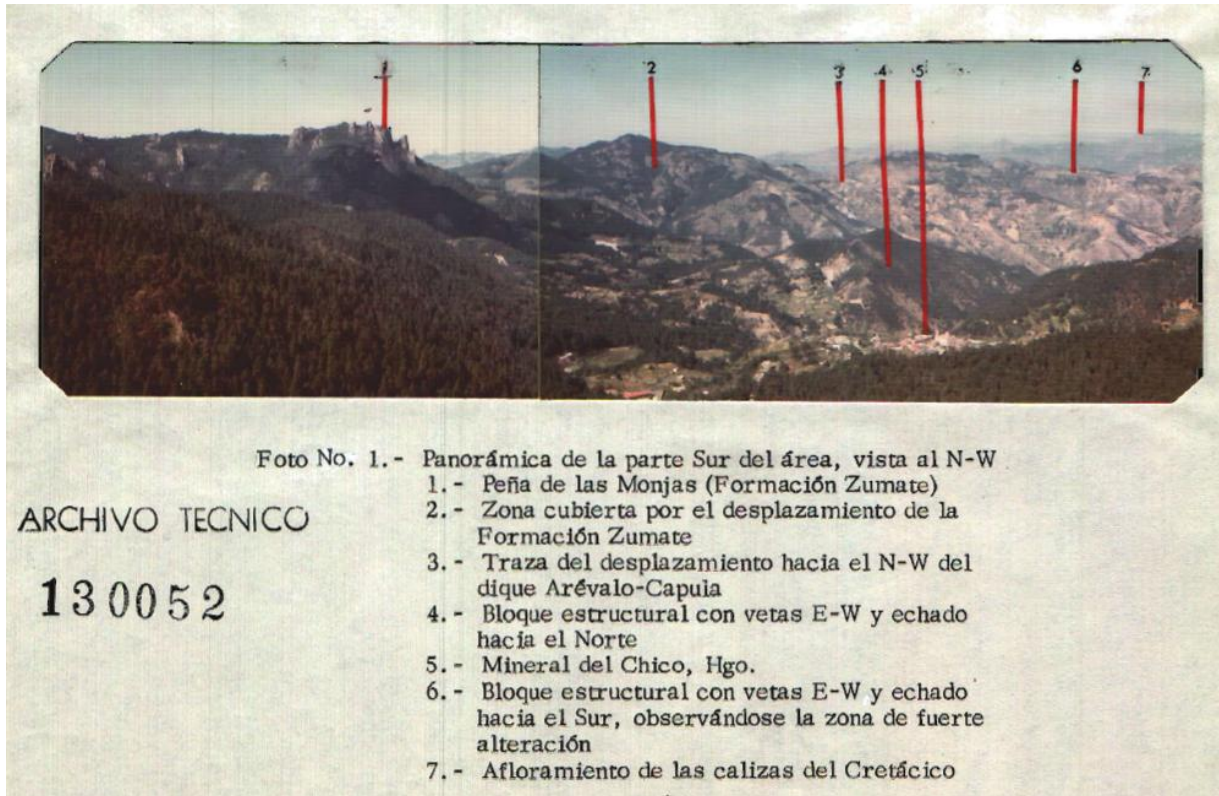


Foto II.1. Panorámica de la parte sur de la zona de estudio, tomada del archivo técnico No. 1374CURRR0001 (Lee et, al 1974).

II.3. YACIMIENTOS MINERALES.

II.3.1. Características generales.

Para cada una de las zonas de estudio, existen características muy importantes que marcan áreas mineralizadas y el objetivo o parte del análisis de esta información es relacionar y combinar los datos existentes en cada uno de los distritos para proponer o definir nuevas áreas prospectivas o continuación de las estructuras mineralizadas en cada una de las zonas, tomando como base datos digitales de información geológico-minero que existen en cada de las áreas.

Al analizar la mineralización a lo largo de la zona de estudio se observan tres distritos mineros argentíferos representativos y distribuidos de la siguiente manera: en la parte sureste se encuentra el **Distrito Minero Pachuca-Real del Monte** entre los poblados de Pachuca y Real del Monte, (Geyne *et, al* 1963), en la parte centro-norte se localiza el **Distrito Minero Mineral del Chico**, dentro del poblado con el mismo nombre y en la parte oeste-noroeste de la zona se ubica el **Distrito Minero Capula-Arévalo**, (Lee *et, al* 1974), entre los poblados Capula, San Jose Tepenené y Plomosas. Estos distritos se mencionan a continuación con sus principales características geológico-mineras a grandes rasgos:

Distrito Minero Pachuca-Real del Monte

Geología. Las rocas que afloran en este distrito está representada por derrames de andesita **(To-A-BvA)** con variaciones a dacita en forma de coladas que presentan una cierta pseudo estratificación en forma alterna, así como rocas volcánicas de edad terciaria de la Formación Vizcaína **(Ts TA-Da)**, y un grupo de unidades litológicas conocidas como Grupo Pachuca. Así mismo se presentan rocas intrusivas representadas por serie de diques considerados como pórfidos cuarcíferos de grano fino **(Tm PR)**, que intrusionan y cortan a las rocas volcánicas (Fig. II.6.).

Estructuras. Los elementos tectónicos mayores del distrito, de acuerdo con la interpretación de los autores (Geyne *et, al* 1963), consisten en la Falla Vizcaína-Rosario Viejo, que atraviesa el distrito en una dirección general NW-SE a este sistema se asocian las principales estructuras mineralizadas, presentando variaciones hacia el E-W Le sigue el sistema de rumbo preferencial N-S, que solo se aprecia en las inmediaciones de Mineral del Monte, cortando al sistema anterior y puede estar originado por el desarrollo de fracturas de tensión, representativas de este sistema las fallas, las cuales presentan mineralización asociada.

Mineralización. La mineralización es variada con minerales de mena como el oro y plata nativos, así como sulfosales, sulfuros y carbonatos como calcopirita, esfalerita, galena, acantita, polibasita, estefanita, argentita, calcocita, covelita, bornita y esternbergita. Se conforman de vetas bien formalizadas a profundidad y asociadas a fallas y fracturas ó a el emplazamiento de diques porfídicos de grano fino **(Tm PR)** muy asociado a las rocas riolíticas de la unidad **(Tm R-TR)**.

Entre la mineralogía de alteración detectada destacan la adularia, pirita, clorita caolinita montmorillonita y epidota, desarrollando alteraciones hidrotermales como la silicificación, argilitización y propilitización. La roca encajonante es predominantemente rocas del grupo Pachuca como la Fm. Vizcaína (ToTA-Da) y la andesita de la unidad (To A-BvA) (Black, et al., 1963).

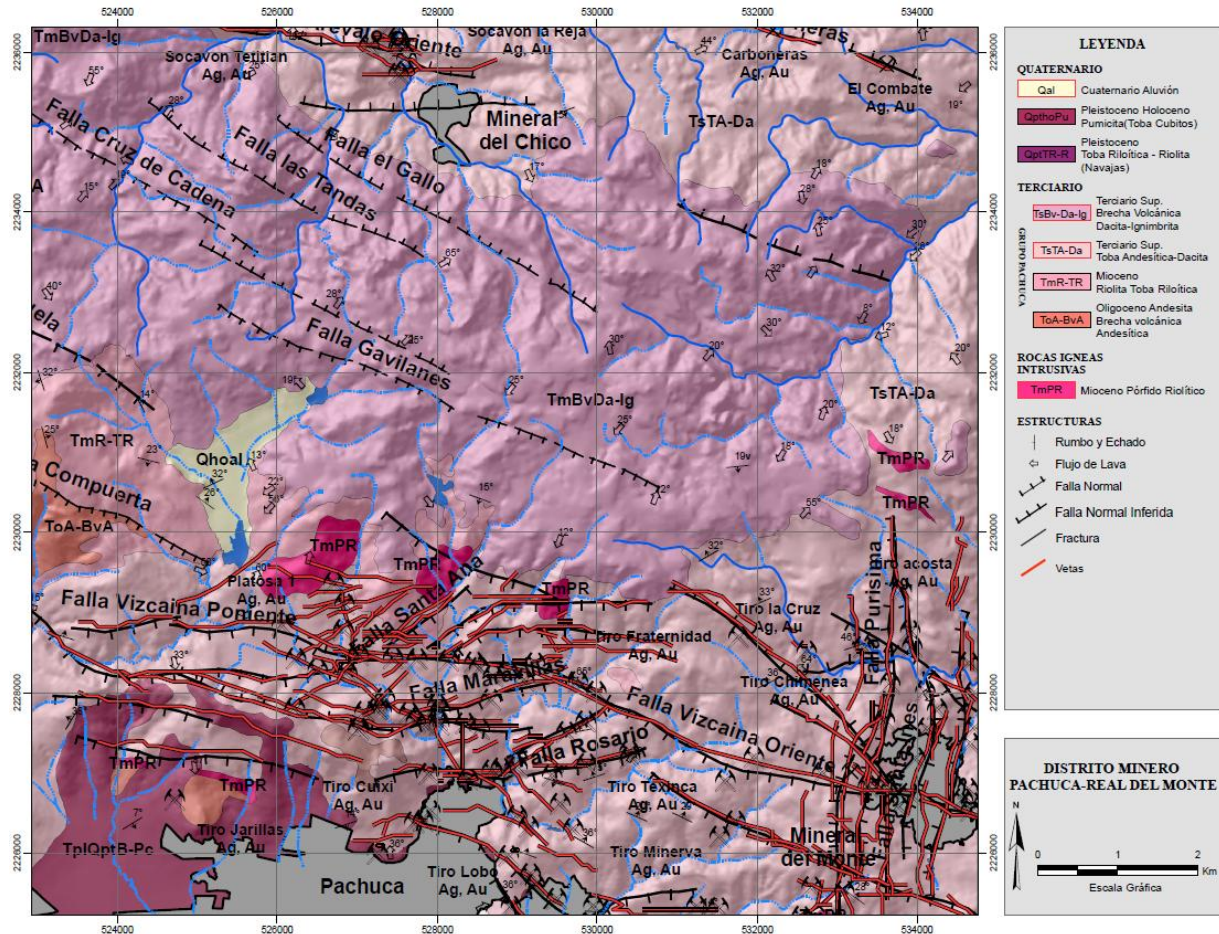


Fig. II. 6. Distrito Minero Pachuca-Real del Monte y sus principales estructuras mineralizadas.

Origen. Su origen puede atribuirse a actividad magmática tardía durante o poco después del emplazamiento de los diques, pero también puede ser en parte a la actividad hidrotermal que precedió y acompañó al relleno de las vetas.

Dimensiones. Las vetas en esta zona presentan longitudes entre 50 y 6,200 m, con espesores que varían en un rango de 0.2 a 16 m y rumbos dentro del primer y tercer sistema estructural antes descritos.

Distrito Minero el Chico.

Geología. Las rocas presente en esta zona están constituidas por rocas volcánicas Fm. Vizcaína (TsTA-Da), e intrusionado de igual manera por serie de diques porfídicos cuarcíferos de grano fino, con rumbos preferenciales NW-SE con tendencia E-W y echados que varían hacia el SW considerados como el patrón principal y cortado por un sistema estructural secundario SE-NW.

Estructuras. En general tomando en consideración el área de afloramientos de los cuerpos intrusivos así como sus texturas y en cierta medida hasta secuencias paragenéticas de las mineralizaciones entre este distrito y el de Capula-Arévalo todo parece indicar que el bloque oriental es decir donde se encuentra este distrito fue desplazado hacia abajo con respecto al de Capula ya que se encuentra en un nivel superior. Las estructuras de este distrito siguen un patrón con rumbo NW-SE (Fig. II.7).

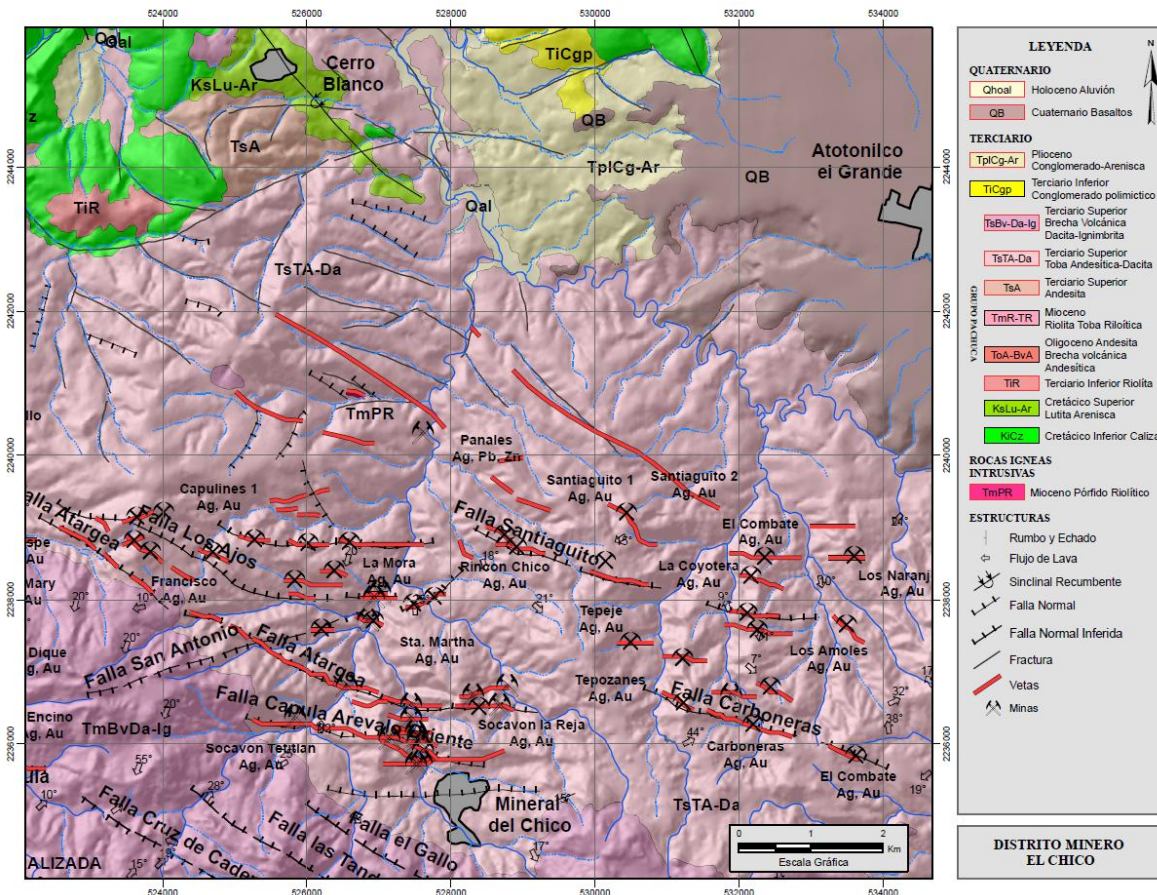


Fig. II.7. Principales estructuras mineralizadas del Distrito Minero el Chico

Mineralización. Dentro de todo el distrito se aprecia una paragénesis semejante con metales nativos, de plata y oro, pocos sulfuros como argentita, acantita y escasa polibasita, galena argentífera, pirolusita y pirargirita, algunas de ellas solo se apreciaron en núcleos de perforación (Valverde R. J. et al., 1981). Las alteraciones más importantes son la argilitización y caolinización las cuales son extraordinariamente llamativas, pero también se puede apreciar localmente sericitización y propilitización.

Dimensiones. Las vetas presentan longitudes entre 50 y 3,000 m con espesores que varían en un rango de 0.1 a 1.5 m. al NW de este distrito. Para la parte este los vetillos oscilan entre 50 y 100 m de longitud y espesores de centímetros, mientras que en la parte central de este distrito las vetas presentan longitudes entre 150 y 3,500 m con espesores que varían de 0.1 a 3 m, con rumbos predominantes E-W.

Distrito Minero Capula-Arévalo

Geología. Las unidades litológicas que afloran en el distrito son rocas volcánicas de composición andesítica y dacítica (**Ts TA-Da**) de la Fm. Vizcaína pertenecientes al grupo Pachuca, así como rocas riolíticas (**TR**) en la parte norte-oeste de este distrito (Fig. II.8). Estas rocas son afectadas e intrusionadas por un pórfido cuarífero félsico (**Tm PR**), descrito como intrusivo cuarífero de grano fino que está relacionado directamente con el enjambre de diques mineralizados del distrito que cortan de igual manera a la secuencia volcánica.

En la parte norte se ubica otra zona conocida como Plomosas está constituida por rocas calcáreas de edades cretácicas de la Formación El Doctor (**Ki-Cz**) y la Formación Méndez (**Ks-Lu-Ar**), así como rocas intrusivas de edad terciaria, consistentes en numerosos diques y cuerpos irregulares.

Estructuras. Las rocas de este paquete volcánico fueron deformadas por movimientos basculantes de intensidad variable entre ligera y fuerte, lo que ha permitido el desarrollo de numerosas fallas con buzamientos ligeramente inclinados de tipo normal, que en su mayoría presentan rumbos de E-W y NW-SE. Una de las principales estructuras presentes en esta zona está caracterizada por el dique falla Arévalo-Capula el cual está considerado como el principal cuerpo de mineralización de importancia económica en la región (García *et al.*, 1988).

Mineralización. La mineralización se presenta en zonas de fracturas y fallas orientadas casi E-W, en diques y vetas de cuarzo consistente de una gran variedad de sulfuros básicos primarios, descritos por (Geyne A. R., *et al.*, 1963), destacando los sulfuros argentíferos, sulfuros de zinc, sulfuros de plomo y sulfuros de hierro y cobre sobre el dique Capula-Arévalo Poniente. Las rocas de caja es la secuencia volcánica dacita-andesita así como los respaldos y fracturas de los diques.

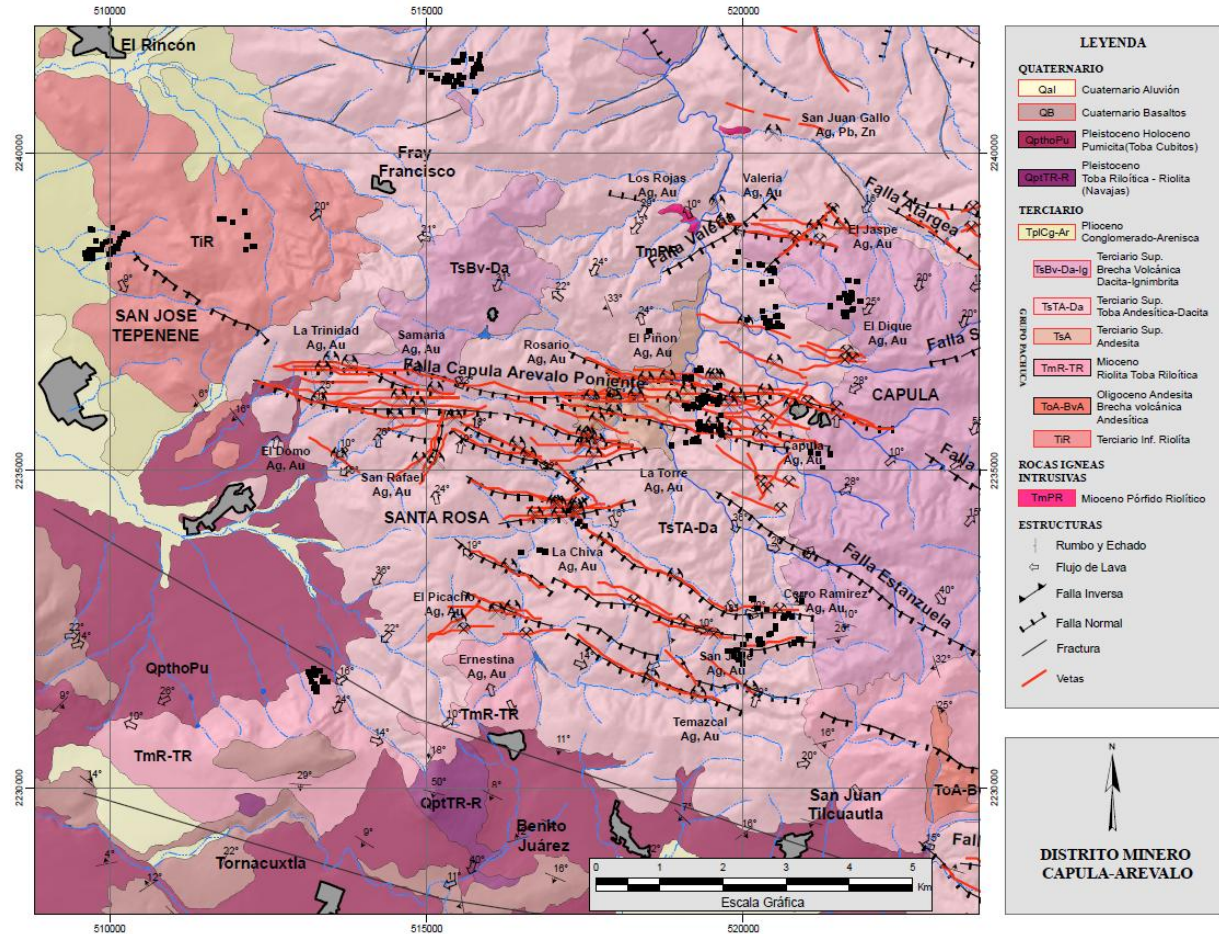


Fig. II. 8. Principales estructuras mineralizadas del Distrito Arévalo-Capula

Esta mineralogía se encuentra íntimamente relacionada a la silicificación y argilización como alteraciones predominantes en los diques, aunque también se observa oxidación. (De los Santos, 1996), producto de la actividad química oxidante y de sulfuros primarios como pirita, calcopirita, galena y argentita a óxidos hematíticos y limoníticos en las proximidades del nivel freático y en superficie. (González. P., *et al*, 1987).

Dimensiones. Para el área San José Tepenené, afloran diques mineralizados con longitudes de 50 a 4,000 m y espesores entre de 0.4 a 3.0 m, en el sistema NW-SE principalmente reportando valores promedio de 69.33 g/t Ag, con 0.29 g/t Au en alguna de las vetas muestreadas y 90.28 g/t Ag, con 0.42 g/t Au, en la estructura Capula-Arévalo Poniente. En la zona de Santa Rosa las estructuras varían de 1,500 a 6,000 m, y espesores de 1.8 a 50 m, que se encuentran en un sistema NW-SE, y cortadas por estructuras del sistema NE-SW, con leyes promedios de 39.33 g/t Ag con 0.14 g/t Au.). Por ultimo la zona mineralizada de Capula enmarca estructuras con tendencia E-W, con longitudes de 1,500 a 3,000 m, y espesores que varían de 5 a 40 m, estas son cortadas por estructuras NE-SW con espesores similares y longitudes de 100 a 1,500 m.

La **Temperatura** de formación de los yacimientos minerales de la zona de estudio se infieren en base a temperaturas de homogenización de inclusiones fluidas, las que varían entre un máximo de 200° C y menos de 100° C al final con el depósito de la plata (Buchanan et al., 1990). Los yacimientos de estos distritos se clasifican como hidrotermales de tipo epitermal de baja sulfuración. La mineralización sería como mínimo de edad miocena de acuerdo a una datación de K-Ar en adularia de 20.3 ± 0.5 Ma. (McKee et al., 1992).

Los elementos o variables que serán considerados, de estos distritos para definir las áreas prospectivas serán analizados por medio de un proceso de análisis jerárquico (AHP) y para su desarrollo e interpretación se tomaran en cuenta las siguientes variables:

- Geología
- Estructuras
- Vetas
- Geoquímica
- Zonas de alteración
- Razones por Óxidos y Arcillas
- Geofísica
- Sensores Remotos

Las capas de imágenes, sensores remotos y magnetometría, serán utilizadas como guía en la sobreposición del resultado del análisis que se efectuara mas adelante en el capítulo de análisis espacial. Se mencionan dentro del proceso general, pero por tratarse de imágenes raster, estos no cumplen con las especificaciones para generar valores relativos en formato vector para su análisis de acuerdo al procedimiento del (AHP).

II.4 INFORMACIÓN SATELITAL

La exploración del espacio exterior ha beneficiado notablemente disciplinas geocientíficas; como la Oceanografía, Hidrografía, Agricultura, Silvicultura, Geografía, Geología, Ecología, urbanismo y otras (Carta Geológica Minera Actopan). Para el caso concreto de la Geología, permite realizar estudios de diferentes características de acuerdo al enfoque que se quiera utilizar, para este caso las imágenes nos permiten determinar diferentes características como alteraciones resultado de la interpretación y análisis de firmas espectrales, definiendo los minerales presentes y su distribución, litologías por medio de rasgos específicos, rasgos tectónicos y estructurales que hacen en conjunto una serie de recursos de información tendientes a la identificación de características especiales que derivan en la posibilidad de establecer y/o identificar sitios favorables en donde puedan ocurrir depósitos minerales.

II.4.1.1. Procesos de elaboración.

Para la zona de estudio, se utilizaron imágenes tipo Landsat TM (Mapeador Temático), 1993, utilizando una combinación en falso color RGB 7-4-1, con resolución espectral de 7 bandas, resolución espacial de 30 metros, resolución IR térmico 120 metros, con anchura del campo de visión de 180 kilómetros, usando el software con plataforma de análisis Er-Mapper, para su proceso.

En la Tabla II.2, se muestran las combinaciones de bandas que más se emplean para los mapeos geológico así como otros tipos de combinaciones de bandas para otros estudios y para el procesamiento de estas imágenes se utilizaron las siguientes combinaciones de

Tabla II.2. Combinación en falso color RGB, para

Combinación de Bandas	Tipo de Estudio
3/1 5/4 5/7	Geología
5/1 4/7 2/4	Geología
5/3 4/7 2/4	Geología
5/7 3/1 7/4	Litología
5/7 3/2 7/4	Litología
1/4 3/2 7/4	Litología
7/1 5/7	Litología
1/4 5/2 4	Litología
4/3 5/7 3/2	Geología
3/5 4/3 7/4	Geología
3/5 5/7 7/4	Geología

bandas en base a imágenes de tipo Landsat TM año 1993.

TM5/TM/7. Permite detectar rocas alteradas con alto contenido de arcilla, mica y roca sulfatada.

TM3/TM1. Permite detectar materiales con alto contenido de limonita. Se pueden utilizar cualquier combinación entre las bandas, que se seleccionan tres a tres cada una de las bandas.

En la Fig. II.9, se muestra la imagen procesada con las bandas 7-4-1, de la zona de estudio en general como resultado de los métodos mencionados anteriormente. Este análisis fue apoyado con un modelo digital de elevación (MDE) escala 1:50,000, elaborados a partir de las curvas de nivel para poder determinar e interpretar con mayor claridad cambios estructurales.

II.4.2. Interpretación de la imagen de Satélite.

Uno de los rasgos a nivel regional que se observan en la imagen de la parte sur de la zona de estudio, es el contacto entre las rocas volcánicas y los depósitos pliocuaternarios que está limitada por un gran lineamiento de orientación NW-SE donde se aprecian varias estructuras volcánicas como conos cineríticos y lóbulos de derrames muy fluidos de tipo basáltico y en la parte norte el contacto entre las rocas volcánicas y las rocas calcáreas de la Formación Doctor.

Aparte de este sistema parecen denotarse algunos curvilineamientos en la parte sur occidental y centro del área de estudio, estos últimos pueden estar relacionados al emplazamiento de domos riolíticos, aunque su coincidencia no es muy clara y en cambio no se aprecia uno que delimite el desarrollo claro de una estructura calderica a la cual asociar el desarrollo de los yacimientos minerales en la zona.

Los resultados de este análisis, además de la identificación de rasgos litológicos y estructurales las zonas de alteración no se pudieron determinar mediante este proceso, por lo que en la razones de bandas se pretende enmarcar estas diferencias, por lo tanto el proceso de imágenes se consideran de forma descriptiva e interpretativa de los rasgos mencionados.

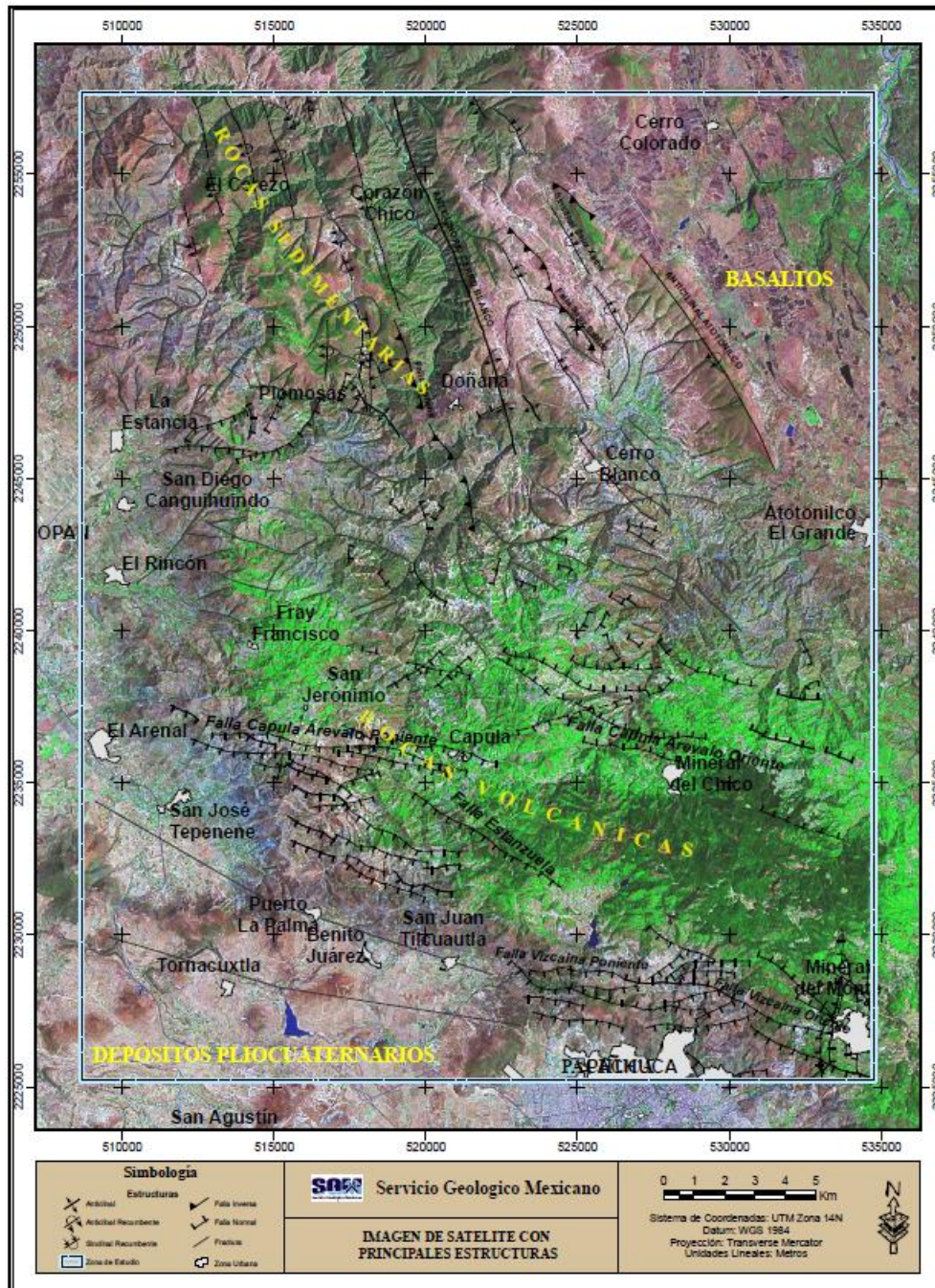


Fig. II.9. Imagen de satélite Landsat con bandas RGB 741 de la zona de estudio.

II.4.3. Razones de banda (Ratios).

Los “Sensores Remotos”, son instrumentos que miden la reflexión y emisión de energía electromagnética en sectores del ultravioleta, visible, infrarrojo, térmico y región de las

microondas del espectro electromagnético. Los ratios son cocientes de bandas que permiten discriminar objetos, gracias a las diferencias evidentes, entre las huellas espectrales de los elementos que se analizan, en determinados sectores del espectro electromagnético, traducidas en curvas de reflectancia.

En la Fig. II.10, se muestra una comparación de firmas espectrales de diferentes satélites, usados en los sensores remotos, donde se observan las respuestas de estas firmas de diferentes satélites, para determinar la presencia de diferentes minerales y sus respuestas en el terreno (arcillas, óxidos, alunita y carbonatos), usando razones de banda (ratios), definidos mediante la división de pixeles de una banda a otra banda.

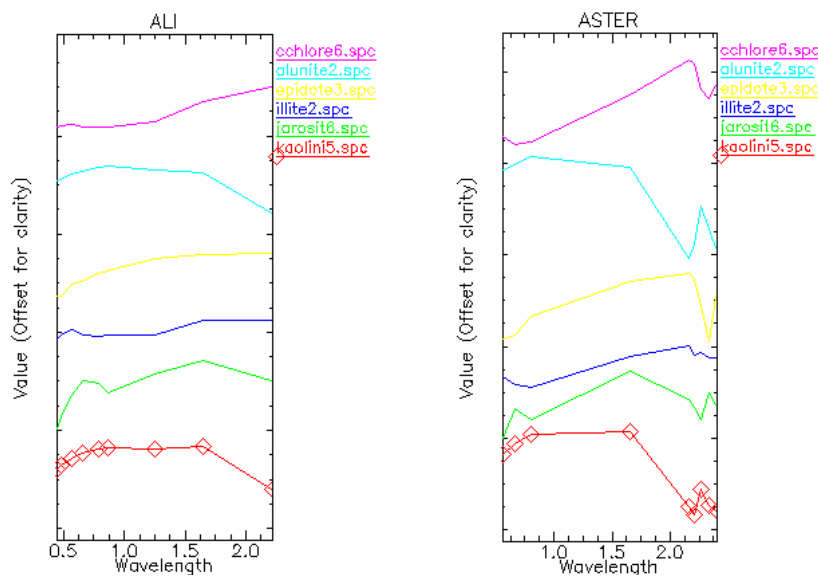


Fig. II.10. Comparación de firmas espectrales de la USGS re-muestreadas con ALI y ASTER

Uno de los propósitos de usar estas razones, fue con la finalidad de observar respuestas de firmas espectrales mediante la generación de razones (Ratios), a través de imágenes tipo ASTER para destacar sitios con presencia de óxidos de hierro (hematita y goethita) Fig. II.11 y arcillas (Sericitita, Illita, Smectita, Caolinita, etc.).

Para discriminar zonas de oxidación se utilizó la razón B3/B1, debido a que en la banda 3 se observan todos los procesos electrónicos de catión Fe^{3+} , y en la banda 1 se da la absorción de los procesos electrónicos de dicho catión; dando así una razón alta en términos de reflectancia de las zonas de oxidación como se puede observar en la figura antes mencionada.

Las respuestas de estas razones se presentan principalmente en la zona de los poblados Mineral del Chico-Capúla-Cerro Blanco en rocas volcánicas, así como en el poblado de Plomosas las respuestas se presentan entre el contacto de las rocas calcáreas y volcánicas. En la zona del poblado de Atotonilco el Grande existen respuestas muy fuertes, pero estas pueden ser originadas por zonas de cultivos, por lo que se debe tener precaución en este tipo de detalles y solo la verificación del terreno nos puede dar veracidad de lo que existe.

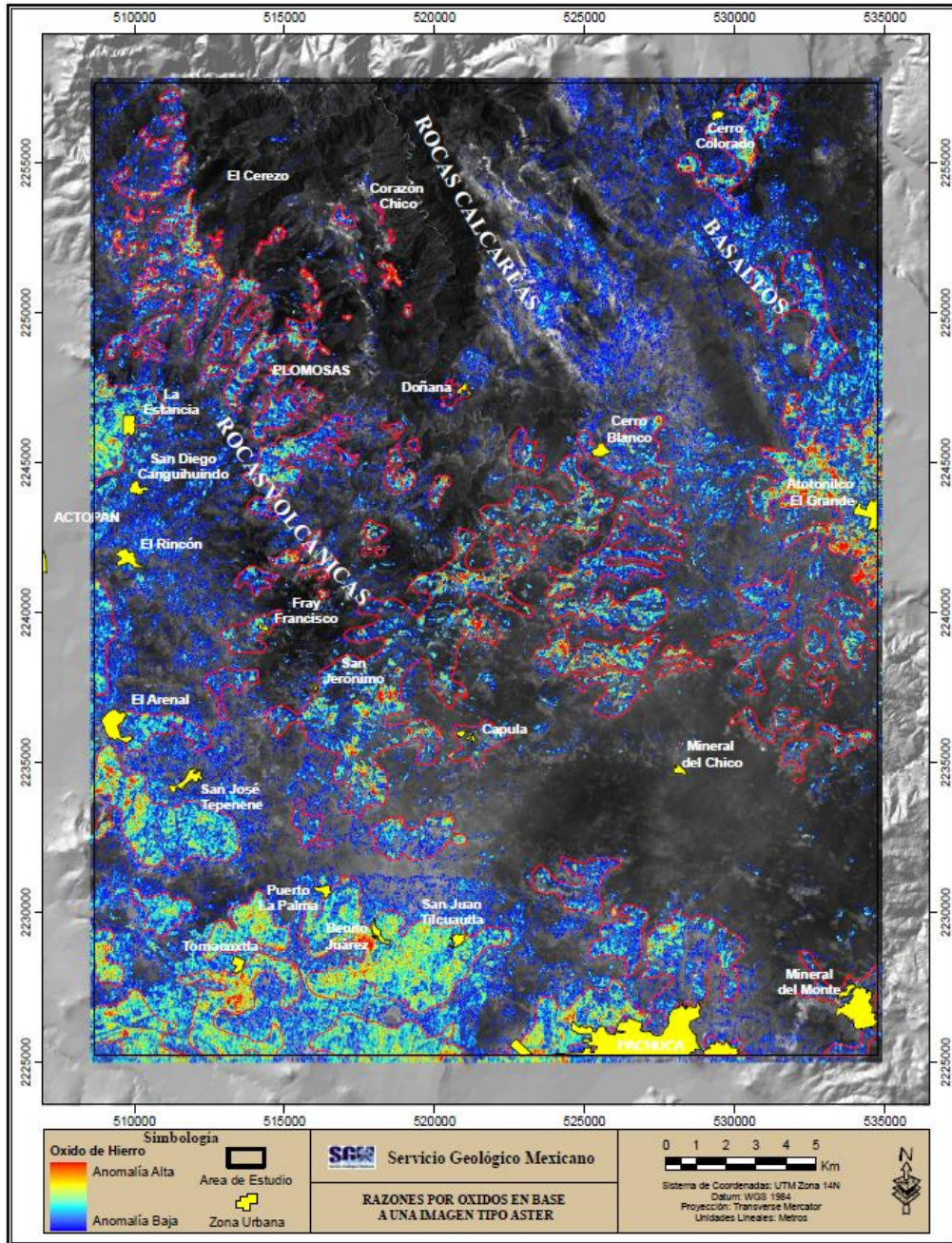


Fig. II.11. Razones por óxidos de la zona de estudio.

Las zonas de oxidación presentes son producto de la actividad química oxidante y de sulfuros primarios como pirita, calcopirita, galena y argentita a óxidos hematíticos y limoníticos en las proximidades del nivel freático y en superficie. (González. P., *et al*, 1987).

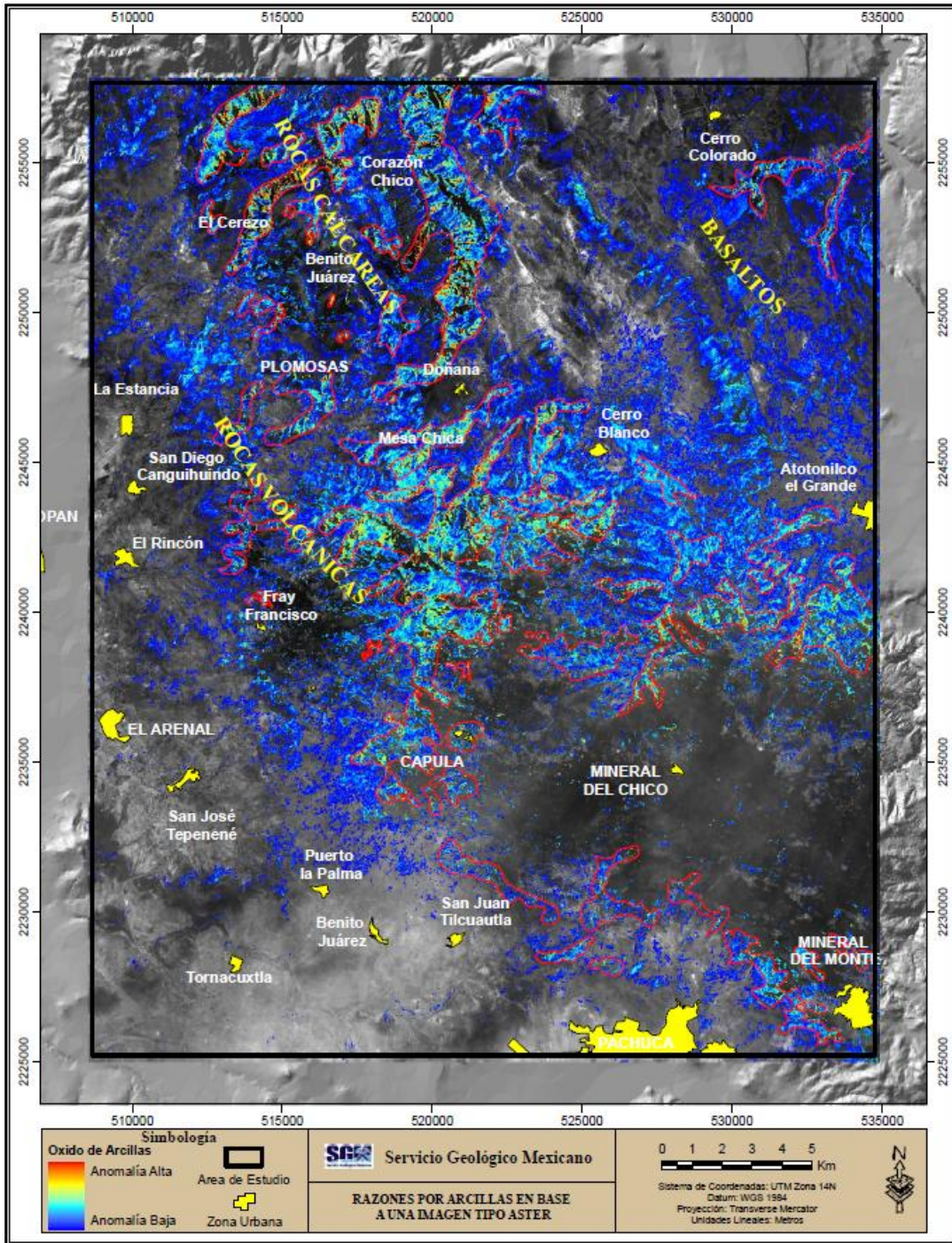


Fig. II.12. Razones por arcillas de la zona de estudio.

Para las zonas arcillosas se utilizaron las razones de la B3/B7, por la buena reflectancia en arcillas entre la banda 3 y en la banda 7, esta se da debido a la absorción del enlace AL-OH (Fig. II.12). Las respuestas de estas razones se muestran en la parte volcánica de la sierra de Pachuca principalmente en la parte norte de Mineral del Chico en un alineamiento este-oeste y en la zona centro, norte y sur de Capula.

También se pueden observar en la parte NW del Real del Monte y en la zona de Plomosas-Benito Juárez entre los límites de las rocas volcánicas con las calizas.

Como resumen se puede decir que, las respuestas de estas razones por óxidos de hierro obedecen a oxidación in situ de ferromagnesianos mientras que las arcillas a la oxidación de feldespatos y vidrios de las rocas volcánicas. Por lo tanto estas razones al ser combinadas con los datos del proceso analítico nos permita establecer si las respuestas de estas razones tienen correlación mineralógica entre si para la determinación de áreas prospectivas presente en la zona de estudio. Así entonces se piensa que a nivel regional esta herramienta no aporta que potenciar zonas de interés sino solo a nivel local con datos más específicos y recientes para una interpretación adecuada.

II.5. INFORMACIÓN GEOFÍSICA CAMPO MAGNÉTICO

En virtud de la dificultad cada vez mayor para la localización de los yacimientos minerales, es necesario auxiliarse con técnicas indirectas de exploración, como son geofísica, geoquímica, imágenes de satélite y otras, las cuales representan valiosas herramientas que deben utilizarse en conjunción para lograr exitosas campañas que conduzcan a encontrar yacimientos minerales susceptibles de ser explotados, así como investigar y evaluar minerales de utilización futura, cuyo potencial es actualmente desconocido.

II.5.1. Procesos de elaboración.

Para la interpretación magnetométrica, los datos fueron obtenidos de los levantamientos aeromagnéticos realizados por el Consejo de Recursos Minerales (hoy SGM) en los años de 1994, 1995 y 1996, y procesados con el software ArcInfo, a una escala regional.

Los intervalos de color de las curvas isomagnéticas pueden variar de acuerdo al tipo de interpretación a que se desea realizar, un ejemplo de ello es la representación que se muestra en la Fig. II.13 donde se observa un dipolo generado a cada 30 nanoteslas (nT),

indicando los bajos magnéticos en tonos de color azul y los altos magnéticos en tonos de color rojo como se indica en la escala de gama de valores de la figura antes mencionada.

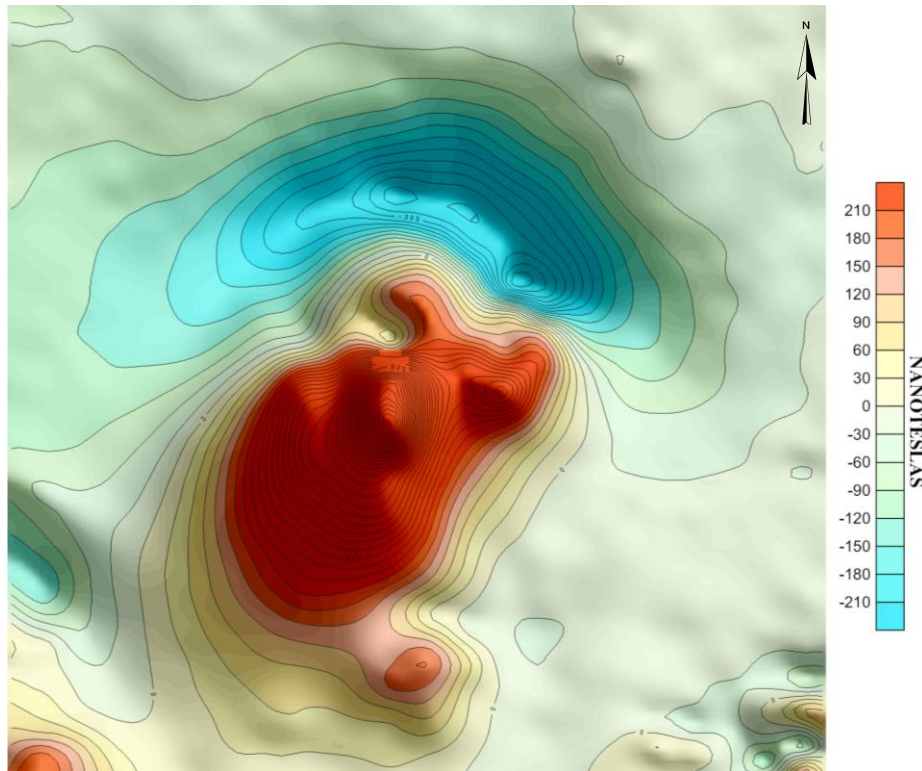


Fig. II.13. Mapa de Campo Magnético Total que representa un dipolo magnético normal para el hemisferio norte.

La magnetización inducida por un cuerpo geológico en el campo magnético terrestre produce una anomalía positiva local y una anomalía negativa subsidiaria. Este campo está representado por la intensidad que refleja un cuerpo magnético en la corteza (Fig. II.14).

Las técnicas usadas de realces aeromagnéticos, definen rasgos geológicos y estructurales del subsuelo con base en el contraste de magnetización de las rocas y minerales ferromagnéticos, diamagnéticos y/o paramagnéticos de la corteza terrestre.

II.5.2. Magnetometría, Campo total.

Para la zona de interés se generaron y procesaron imágenes magnetométricas, en una escala 1:50,000, a un nivel regional para su análisis, en el cual se realizó una interpretación

cualitativa que consiste en gran parte reconocer y delinear la forma e intensidad de las anomalías magnéticas (Vélez, 2010) y la correlación de éstas con la geología del área de estudio, así como un análisis cualitativo más profundo que recae en el uso del realce de la información sobre mapas derivados a partir de los mapas de Campo Total.

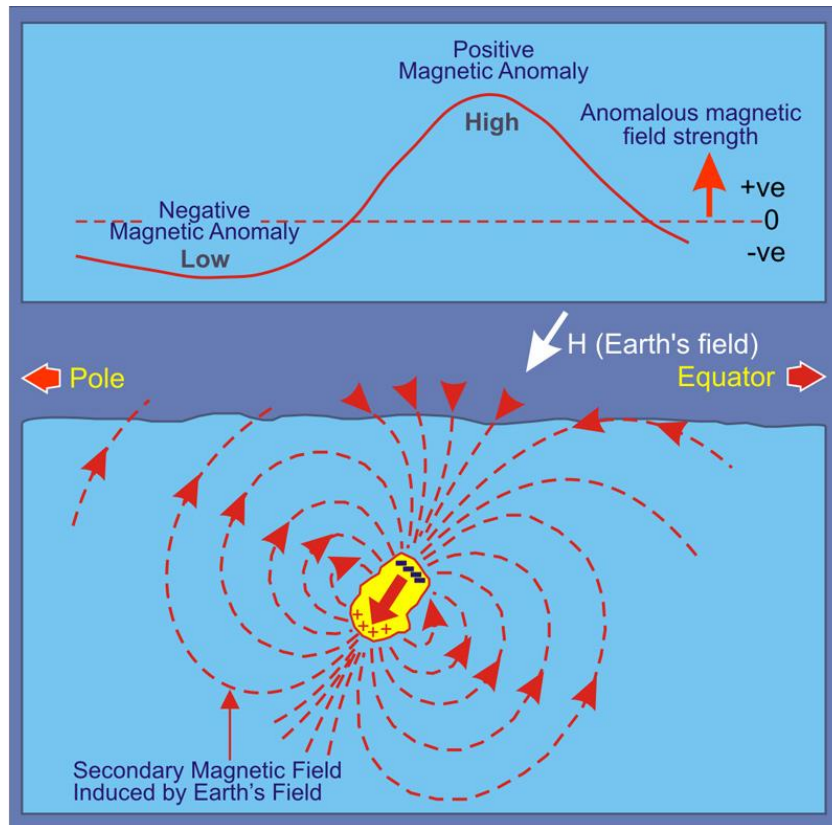


Fig. II.14. Representación de la anomalía magnética generada por un cuerpo magnético en el campo magnético terrestre.

Para la zona de estudio, se realizó un cálculo de profundidad usando una técnica de interpretación cuantitativa, conocida como espectro de energía mediante el análisis de Fourier, que nos permitió diseñar filtros en el dominio de las frecuencias para estimar el nivel de ruido de los datos aeromagnéticos, la profundidad de las fuentes magnéticas como intrusivos sepultados o profundidad de basamento a partir de este método espectral.

Como podemos observar en la Fig. II.15, la frecuencia marcada en azul, determina a profundidad cuerpos con fuentes magnéticas de hasta 7 km, y la frecuencia marcada en color rojo determina fuentes magnéticas someras de 0 a 750 metros.

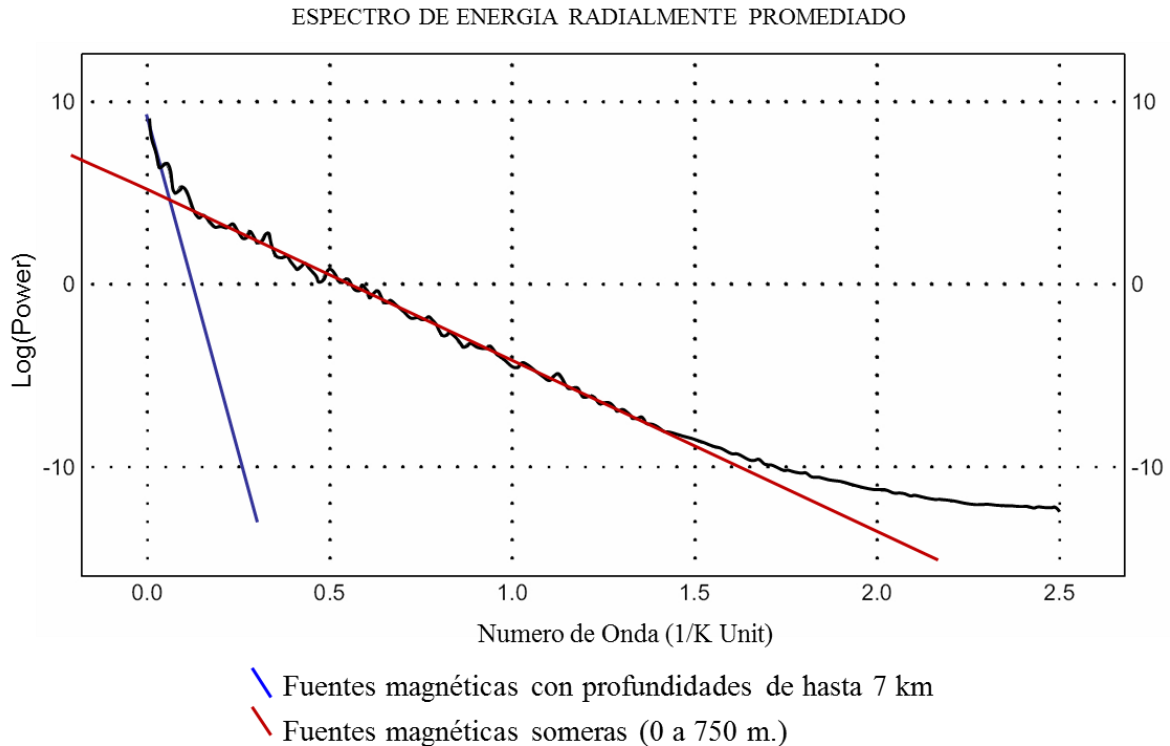


Fig. II.15. Interpretación de frecuencias magnéticas de la zona de estudio.

Estas pendientes de frecuencias están relacionados directamente a las profundidades de las diferentes estructuras geológicas, las de mayor inclinación se correlacionan a estructuras profundas, mientras que las menos inclinadas son indicativas de estructuras geológicas mas someras o superficiales.

De acuerdo a este análisis de frecuencias magnéticas se observaron las siguientes características:

a). En la Fig. II.16 se observa una imagen magnetométrica regional elaborada a una profundidad de 3000 metros, en donde se interpretó una lineamiento regional con dirección E-W que marca el límite del distrito minero Pachuca-Real del Monte, con las rocas sedimentarias de la Fm. Doctor, que pudo afectar el comportamiento y dirección de las estructuras principales que se presentan en la zona norte de estudio.

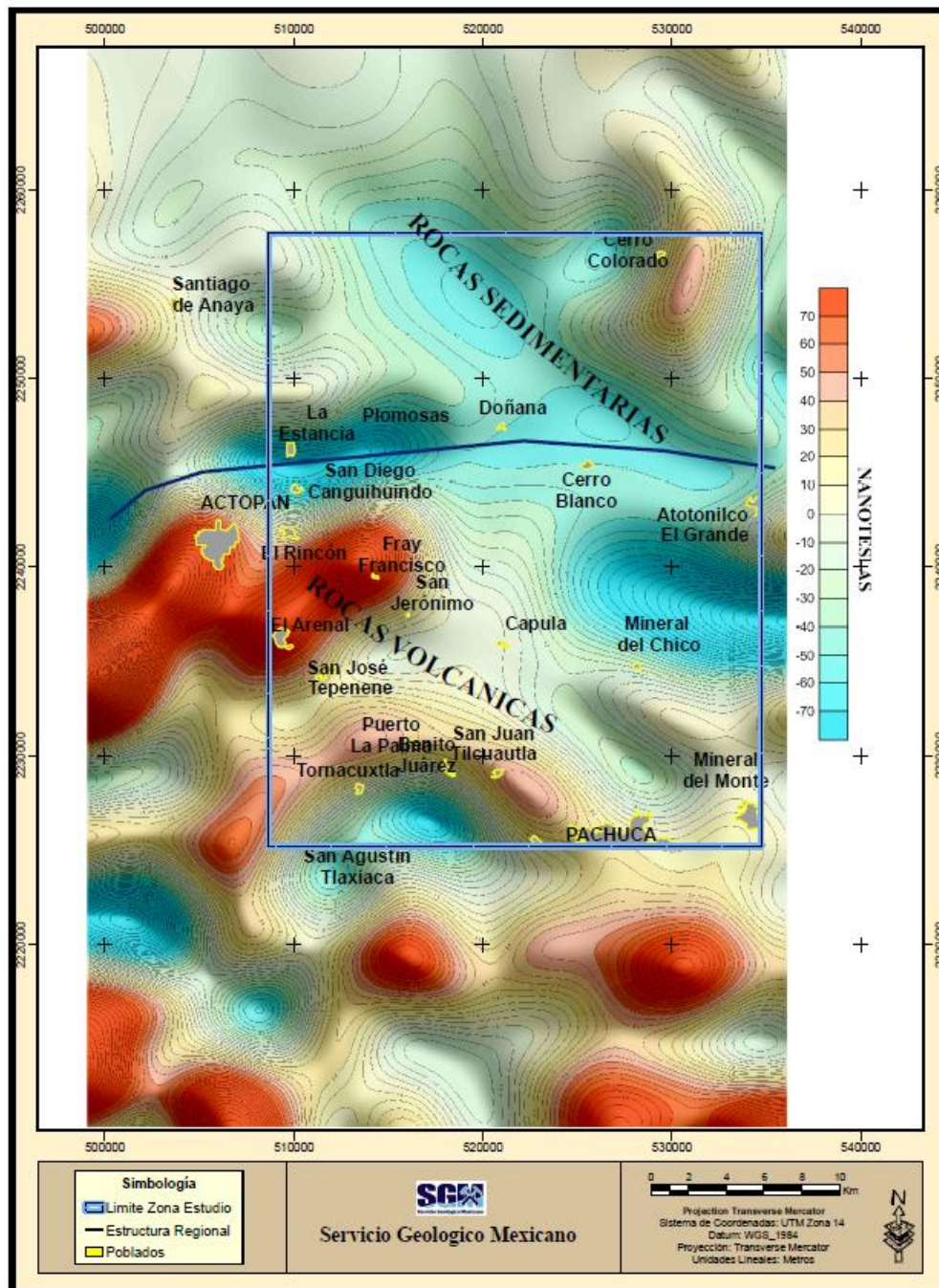


Fig. II.16. Interpretación de la estructura regional que marca el límite norte del distrito minero Pachuca-Real del Monte, en base a una imagen magnetométrica regional.

b). En la parte sur de la zona de estudio, de acuerdo a una imagen residual con frecuencias magnéticas de 3000 mts, de profundidad, se observa un lineamiento en dirección NW-SE como se muestra en la Fig. II.17, que esta delimitando a la parte sur poniente del distrito

minero Pachuca-Real del Monte, este lineamiento pudo haber afectado la continuación de la mineralización en la zona y se encuentre en un bloque caído y este cubierto por las rocas volcánicas reciente.

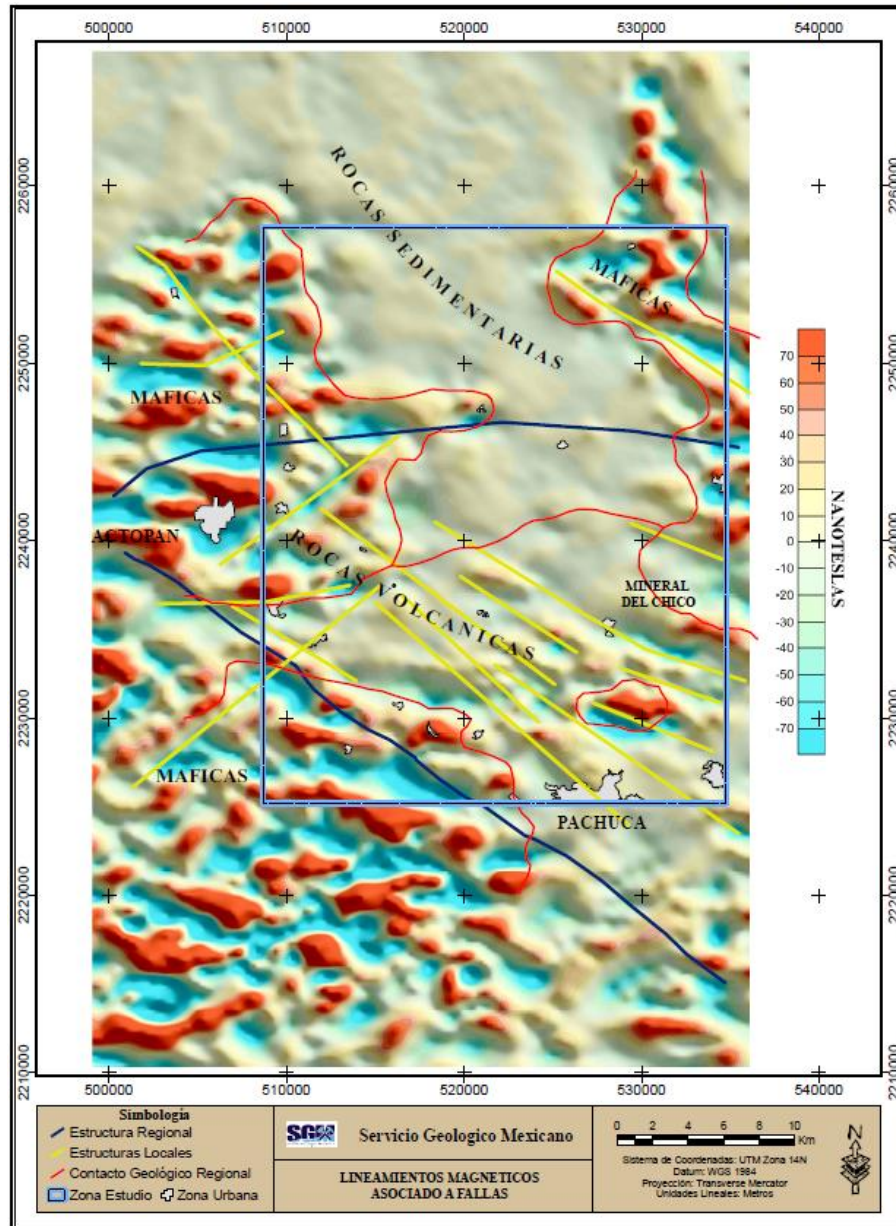


Fig. II.17. Interpretación de lineamientos regional y local en dirección NW-SE asociado a fallas interpretadas en base a la imagen magnetométrica residual.

Así mismo se puede observar lineamientos locales que van paralelos a este lineamiento principal y están asociados con el patrón estructural de esta zona sur de estudio y el emplazamiento de la mineralización polimetálica de la zona de estudio.

c). En algunas zonas que no se observan respuestas magnéticas se presentan alteraciones de tipo argílica (minerales de arcilla) muy fuerte como la zona de Capula y Mineral del Chico, la alteración de tipo propilítica (clorita y epidota), se presenta en la zona de San José Tepenené así también zonas de oxidación-argilización en la parte oeste del poblado Doña-Cerro Blanco como se muestra en la Fig. II.18.

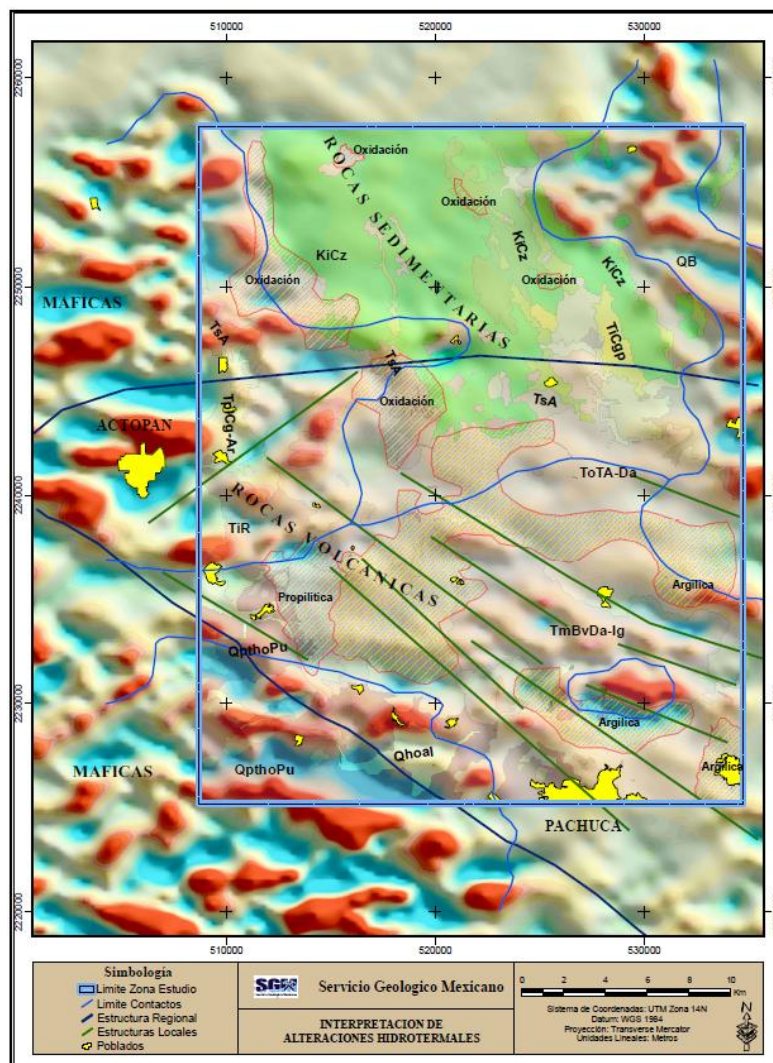


Fig. II.18. Interpretación de zonas de alteración que se presentan en la zona de estudio, identificadas a partir del campo magnético residual (Filtro Pasa Altas).

La nula respuesta magnética de estas áreas probablemente se deba a estas alteraciones hidrotermales provocadas por fluidos hidrotermales de intrusiones de tipo riolítico que no llegaron a la superficie, dichos fluidos afectaron los minerales ferromagnesianos de la roca encajonante dando respuesta a las alteraciones mencionadas, que posiblemente dieron origen a la mineralización que se encuentran en zonas de fracturas y fallas que llegaron a emplazar los minerales que rellenan estas fracturas.

Esta interpretación magnetométrica se combinará con los resultados del análisis del AHP de los layers utilizados en el análisis espacial, mediante el SIG.

II.6 Procesos de información y Variables a utilizar en el SIG.

El análisis espacial de la información generada en los estudios geocientíficos ha consistido tradicionalmente en la superposición de los datos analógicos recopilados en forma de mapas en una mesa para realizar un posterior análisis visual (Bonham-Carter, 1994). Con el uso de los sistemas informáticos esta aproximación ha sido remplazada por un proceso digital semiautomático, mucho más eficaz, realizado con la ayuda de programas informáticos SIG o CAD. Sin embargo, con cierta frecuencia, aún hoy día, el nuevo proceso es análogo al tradicional, en el sentido que el análisis se limita a la superposición de los datos digitales para generar nuevos documentos cartográficos de interés en la aplicación en curso.

En los últimos años, no obstante, la etapa en que los datos básicamente se almacenan en bases de datos espaciales SIG para confeccionar cartografías o mapas puramente descriptivos, está evolucionando a una nueva fase caracterizada por un mayor peso del análisis numérico intensivo de los datos disponibles (Rigol-Sánchez, 2000). Para estos casos el estudio indicado es precisamente en el análisis de información geológico minera, mediante estos procesos, combinados con otros procedimientos como los procesos de análisis jerárquico que nos llevan a predecir mapas o planos de aptitudes en la exploración minera.

Las capas de datos (variables) que se usaran, se clasificaran haciendo una diferenciación entre los distintos factores que pueden tener influencia en la ocurrencia mineralógica de las áreas en estudio.

Los factores que se muestran en la Tabla II.3 fueron determinados de acuerdo a la importancia de cada uno de los niveles de información geológica-minera para su análisis posterior del área especificada.

El cuadro II.1, se muestra los atributos de la parte geofísica así como las razones (ratios) que no serán tomados en cuenta directamente dentro del proceso de los atributos por ser consideradas como imágenes tipo raster pero si como herramienta auxiliar en el análisis de los datos.

Tabla II.3 Definición de atributos y escala de medición de la zona de estudio.

Atributo	Definición	Escala de Medición	Jerarquía
Geoquímica	Au (Oro)	ppb	1
	Ag (Plata)	ppm	2
	Pb (Plomo)	ppm	3
	Cu (Cobre)	ppm	4
	Zn (Zinc)	ppm	5
Geología	Porfido Riolitico	Proporción	1
	Brechas Volcanicas, Dacitas, Tobas Andesiticas, Andesita	Proporción	2
	Caliza, Lutita-Arenisca	Proporción	3
Estructuras	Falla Normal, Falla Inversa	Intervalo	1
	Fracturas	Intervalo	2
Zonas de Alteración	Argilica	Proporción	1
	Propilitica	Proporción	2
	Oxidacion	Proporción	3
Vetas	Favorables	Longitud	1
	No favorables		2

Atributo	Definición	Escala de Medición	Valor	Peso
Razones (Ratios)	Raster	Puntos por pixels	Numericos	Auxiliar
Magnetometria	Raster	Puntos por pixels	Numericos	Auxiliar

Cuadro II.1. Datos magnetométricos y razones utilizadas en la zona de estudio.

II.6.1. Proceso de Análisis Jerárquico.

Una de las características a tomar en cuenta para el desarrollo de este proyecto es la utilización de las variables que serán utilizadas para integrar un proceso de análisis jerárquico en combinación con el SIG.

El Proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por (Saaty, 1980), está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio.

En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. La ventaja de éste, consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.

Los parámetros o variables que se utilizarán serán basados a los criterios de una matriz en forma de pares (pareada) y el orden de como serán tomado en cuenta las variables para su proceso en el análisis jerárquico, de acuerdo a la Tabla II.4 será en función a los factores determinantes en cada uno de los niveles de información, por lo que cada factor dependerá del rango de peso que se le asigne para su combinación en cada uno de ellos y un área de influencia dentro del análisis predictivo de la zona de estudio.

Tabla II.4 Matriz de comparaciones pareadas para el uso de las variables

Criterio	GEOQUIMICA	GEOLOGIA	ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	VETAS
GEOQUIMICA					
GEOLOGIA					
ALTERACIONES					
ESTRUCTURAS					
VETAS					

CAPITULO III.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS

La prospección geoquímica, es una herramienta altamente útil durante la exploración minera, pues su aplicación permite cubrir grandes superficies de terreno en tiempos relativamente cortos y sin mucho costo. Su interpretación se realiza en base a resultados, por ejemplo sedimentos activos de arroyo, de suelo, rocas, vegetación, agua y gases. La interpretación se basa en principios de dispersión geoquímicas primarias (exógenos) o secundarias (endógenos).

El análisis estadístico es una herramienta que se emplea para estudiar el comportamiento de una población, conjunto, finito o infinito de elementos; ya sea que se cuente con todos los elementos de ella o a través de una muestra o subconjunto de la población. Existen diversos parámetros que describen de manera sintética a una población, por medio de su función de distribución, media, moda, mediana, varianza y desviación estándar (Mayor-Gallego, 2004).

En el desarrollo de este capítulo, se manejaron las dos zonas por separado, por los diferentes análisis geoquímicos de los sedimentos de arroyo que se realizaron en cada una de las áreas. Para los fines del proceso, el desarrollo se efectuó como: Zona Actopan y Zona Pachuca.

III.1. Descripción de los datos.

Los muestreos geoquímicos de sedimentos de arroyo presentados en este proyecto se encuentran ubicados dentro de dos zonas, la primera zona corresponde al área de (Actopan), al norte de la zona de estudio y la segunda zona corresponde a la zona denominada (Pachuca), al sur de la zona de estudio. Estas dos zonas se pudieron englobar en una sola área, pero para los fines de análisis se trabajaron por separado, por los muestreos realizados en distintas épocas entre una y otra.

III.1.1. Zona Actopan.

Para esta zona, la base de datos del muestreo geoquímico utilizado, fue tomada de la carta geológico-minera Actopan clave E14-D71 escala 1:50000, elaborada en el año 1995, basándose en el formato convencional de la base topográfica del INEGI (Actopan clave E14-D71) con la misma escala.

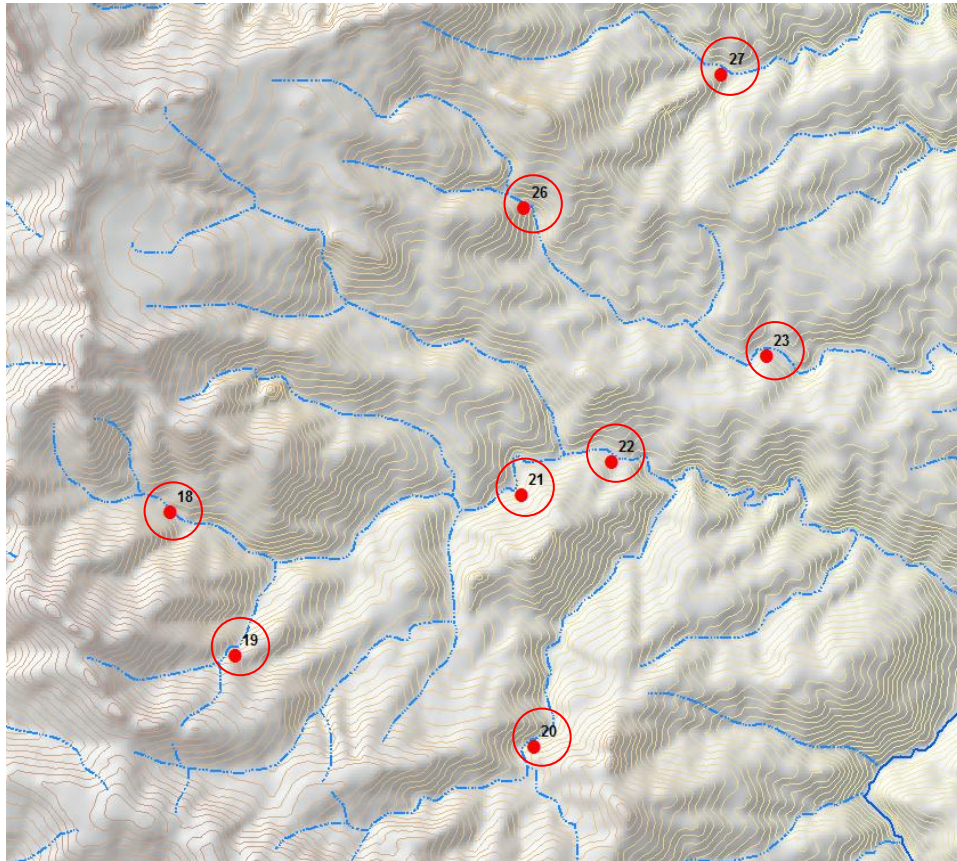


Fig. III.1. Distribución de los muestreos de sedimentos de arroyo y su posición sobre las corrientes hidrográficas.

El procedimiento para la ubicación del muestreo, fue remarcando los drenajes y delimitando en forma clara las cuencas y sub-cuencas hidrológicas para ubicar los puntos de muestreo (Fig. III.1).

El muestreo se elaboró con una densidad de 5 km² por muestra, en la escala antes mencionada, colectando un total de 161 muestras de sedimento activo, en corrientes primarias o secundarias, el cual fue tamizado a menos 80 mallas; dichos sedimentos se colectaron con un peso aproximado de 1 kg cuando el sedimento estaba húmedo colectándose un volumen de 4 a 5 kg., secándose al medio ambiente para su posterior tamizado, todas las muestras fueron colectadas en tiempo de secas.

Para el análisis de estas muestras de toda la población se utilizó el 10% de ellas, y los elementos analizados fueron 10 (oro, plata, plomo, zinc, arsénico, cobre, hierro, antimonio,

telurio y selenio), y para el análisis estadístico se tomaran en cuenta los siguientes elementos Au, Ag, Pb, Cu y Zn.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio químico del SGM (antes CRM), por el método de "Absorción Atómica". (Carta Geológica Minera Actopan F14D71) y toda la remesa fue tratada con la misma calibración de equipo, evitando así variaciones significativas en las mediciones.

III.1.1.1. Estadísticas Básicas.

De las muestras mencionadas anteriormente se hizo un recorte de estos análisis para la zona de estudio con límites entre las coordenadas en formato UTM 508665 Este, 2257683 Norte y las coordenadas 534747 Este, 2239186 Norte, con un total de 79 muestras, con las cuales se realizará el análisis estadístico para conocer el aporte y distribución de los elementos.

La estadística busca estudiar una o varias variables conocidas vía una toma de muestra, el cual tiene como objetivo, analizar la cantidad, la calidad y la ubicación de los datos disponibles. Para este desarrollo se realizó un estudio exploratorio de los datos disponibles, con los procedimientos que se describirán a continuación.

a). Estadísticas elementales.

Junto con los histogramas, los parámetros estadísticos básicos como media desviación estándar, valor máximo y mínimo se determinaron sobre la distribución de valores, utilizando las variables (Au, Ag, Pb, Cu, Zn), así como otros valores calculados (Tabla III.1).

Tabla III.1. Parámetros estadísticos básicos de la zona I (Área Actopan)

Elemento	N° de Muestras	Media (Background)	STD	%Coef. Variacion	Valor Max.	Valor Min.
Au ppb	79	27.41	12.96	47.29	96.00	9.00
Ag ppm	79	1.61	0.79	49.22	3.00	1.00
Pb ppm	79	34.86	63.62	182.50	577.00	12.00
Cu ppm	79	13.09	5.20	39.70	26.00	6.00
Zn ppm	79	48.43	16.08	33.20	117.00	19.00

b). Despliegue de los datos geoquímicos (En un mapa).

El despliegue de los datos muestreados nos permitirá visualizar su ubicación en el espacio dentro de un plano georreferenciado con coordenadas X, Y.

Para esta zona los datos se representaron en un mapa en dos dimensiones, que incluye la información sobre los datos medidos en los sedimentos de arroyo donde se ubicaron los valores de los elementos por concentración máxima de (Au, Ag, Pb, Cu, Zn), los criterios para su representación grafica fueron determinados a partir del software Geostatistical Analyst de ArcGis como se puede observar en la Fig. III.2.

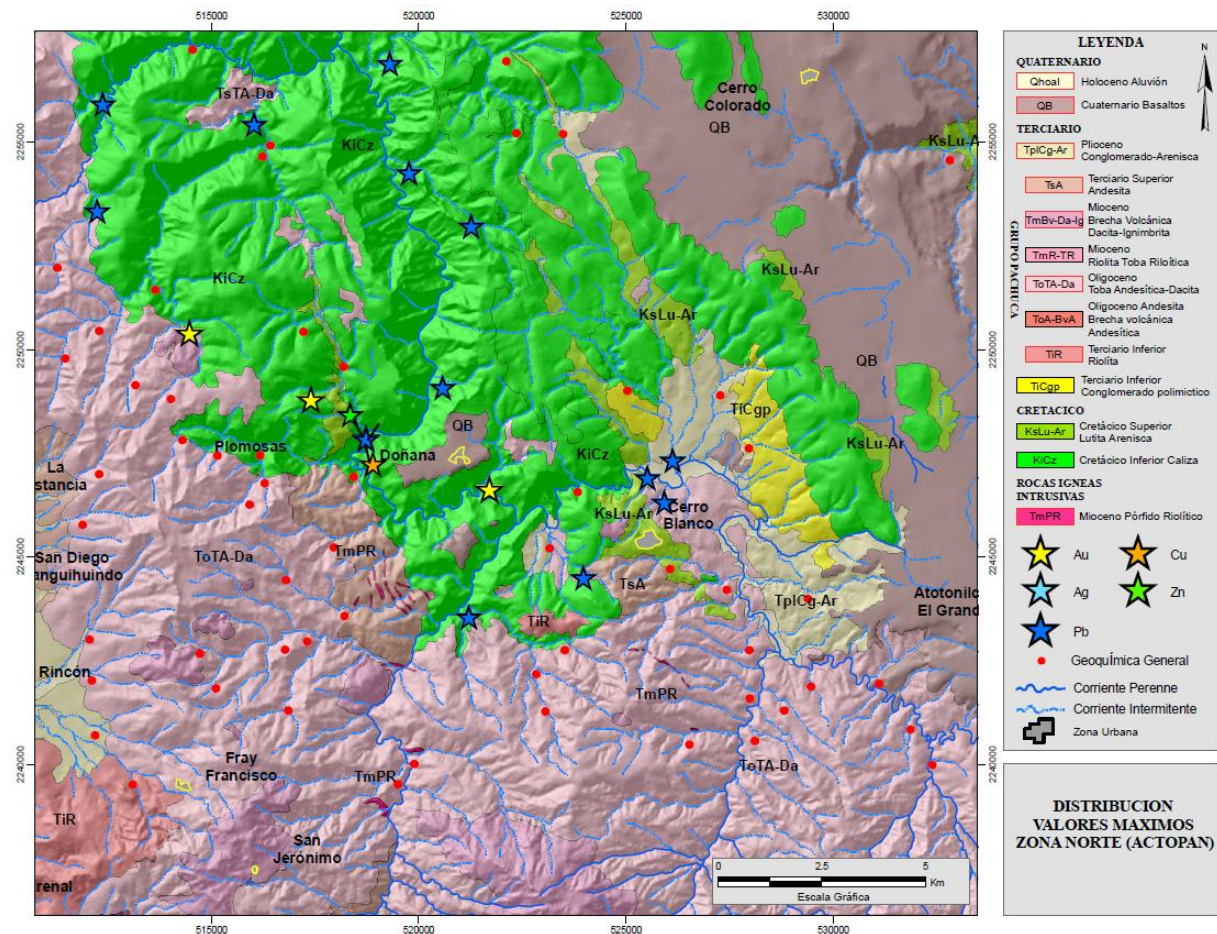


Fig. III.2. Distribución de los valores máximos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) de la zona Actopan.

c). Distribución Estadística de los Valores (Histogramas).

Por otra parte después de ver la distribución espacial de los datos, también nos interesa conocer la distribución estadística de sus valores, los histogramas permiten representar gráficamente las frecuencias que ocurren en función de su valor. Estas frecuencias nos

sirven para detectar posibles valores atípicos (outliers), que determinan los datos atípicos alejados de la población normal en base a los demás elementos.

Los datos atípicos que dieron respuestas por los histogramas fueron el (Au, Pb, Zn), las coordenadas obtenidas de estos elementos fueron representarlos en un plano geológico y observar su ubicación en cuanto a los demás datos geoquímicos en la zona como se observa en la Fig. III.3. Estos datos atípicos muestran en un alineamiento con dirección NW-SE, entre los contactos de las rocas volcánicas y rocas calcáreas, su relación puede estar correlacionada por la presencia de mineralización e intrusivos riolíticos en la zona.

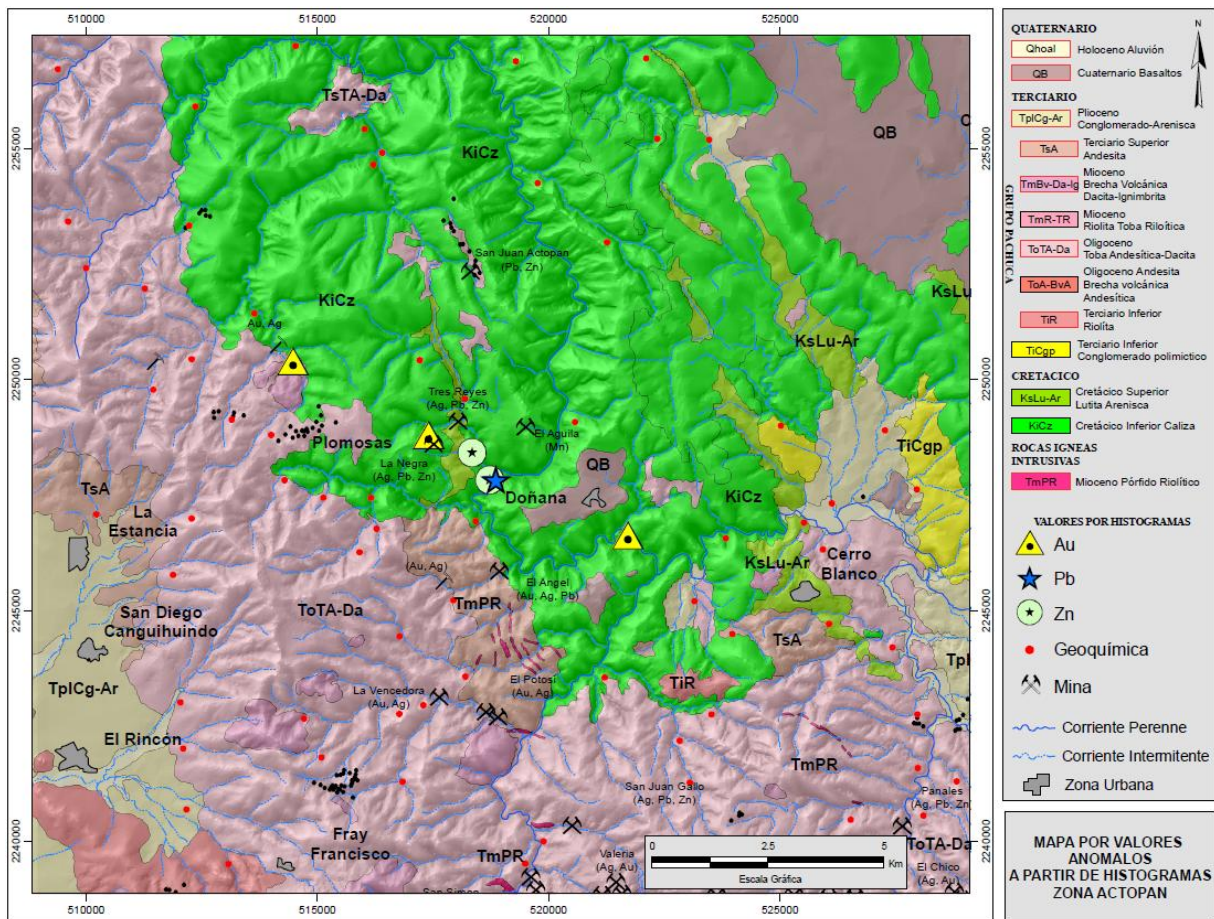


Fig. III. 3. Representación de datos atípicos del (Au, Pb, Zn) en base a histogramas para la zona norte (Actopan)

III.1.1.2. Correlación entre elementos.

Cuando los conjuntos de datos a analizar consisten en pares de valores que guardan algún tipo de dependencia entre sí (datos pareados), el gráfico que normalmente se emplea es el de dispersión (Ross, 2007; Isaaks y Srivastava, 1989).

El mismo consiste en un gráfico cartesiano con dos ejes perpendiculares, donde se ubican en cada eje los datos de cada grupo. El resultado es una serie de puntos que forman una “nube” de dispersión correspondiente al grupo de datos pareados en cuestión. Al estar analizando la relación de dependencia de los dos grupos, este gráfico se suele acompañar por una “línea de tendencia”, que consiste en la regresión lineal simple de mejor ajuste por cuadrados mínimos.

El coeficiente de correlación más ampliamente empleado es el de Pearson o coeficiente de correlación lineal. Mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente (Stigler, 2008) y determina hasta dónde los valores de ambas variables son proporcionales entre ellos. El valor del coeficiente no depende de las unidades de medidas.

El coeficiente toma valores en el intervalo [-1; 1], correspondiendo +1 a una correlación lineal perfecta con pendiente positiva, - 1 a una perfecta pero con pendiente negativa y 0 indica la ausencia total de correlación lineal. Fig. III.4 y III.5.

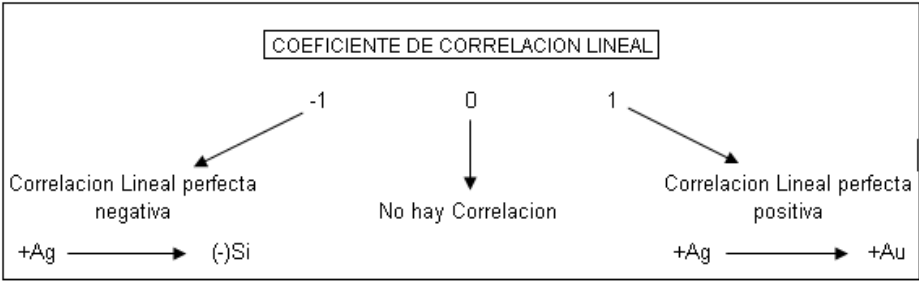


Fig. III.4. Coeficiente de correlación

POSITIVA				
RANGOS				
1 - 0.9	0.9 - 0.8	0.8 - 0.7	0.7 - 0.6	0.6 - 0.5
NEGATIVA				
RANGOS				
-1 -- -0.9	-0.9 -- -0.8	-0.8 -- -0.7	-0.7 -- -0.6	-0.6 -- -0.5

Fig. III.5. Rangos de coeficiente de correlación

Para determinar la correlación de los elementos de esta zona (Actopan), se revisó adecuadamente la tabla de los elementos geoquímicos de sedimentos de arroyo para

proceder a realizar este proceso, basado en las variables (Au, Ag, Pb, Cu y Zn). Se usó como herramienta simple el software de Excel que nos permite visualizar resultados preliminares aunados con gráficos de dispersión y detectar valores anómalos en primera instancia.

El siguiente procedimiento fue efectuar el análisis de los datos para sacar el coeficiente de correlación de los elementos y determinar qué elementos son correlacionables entre sí (Ver Tabla III.2), observando una matriz con una correlación muy significativa entre el Zn y el Cu (0.746) y acercándose a .5 la correlación entre la Ag-Cu (0.424)

Tabla. III.2. Matriz de correlación lineal para la zona I (Área Actopan)					
	<i>Cu_ppm</i>	<i>Au_ppb</i>	<i>Ag_ppm</i>	<i>Pb_ppm</i>	<i>Zn_ppm</i>
<i>Cu_ppm</i>	1.000				
<i>Au_ppb</i>	0.050	1.0			
<i>Ag_ppm</i>	0.424	0.1	1.000		
<i>Pb_ppm</i>	0.170	0.1	0.215	1.000	
<i>Zn_ppm</i>	0.746	-0.1	0.155	0.208	1.000
		Rangos	Correlacion		
		0.8 - 0.7	Cu - Zn		

Para esta correlación el zinc está considerado como un elemento calcófilo (Fase sulfuro) (Goldschmidt, 1954), que presenta una fuerte afinidad con el azufre y débil con el oxígeno. El contenido de zinc en sedimentos de arroyo para esta zona alcanza un máximo 117 ppm y el promedio en rocas de la corteza ha sido estimado en 80 ppm (Taylor & McLennan, 1985).

Por tanto, esta correlación positiva significativa entre el Zn-Cu, es indicador de mineralización de tipo Polimetálica al menos de Zn y Cu. Esta correlación se relaciona con las rocas (Calizas) de la Fm. Doctor, donde se encuentran minas abandonadas que fueron explotadas por Ag, Pb y Zn, lo que hay evidencia de estos elementos anómalos y la mineralización probablemente esté ocupando cavidades de disolución en estructuras de tipo (paleo karts) (Carrasco *et al.*, 2004).

III.1.1.3. Nubes de dispersión.

Dado que las muestras de sedimentos contienen materiales provenientes “río arriba”, los análisis geoquímicos representan un promedio ponderado de las concentraciones in situ de

las zonas ubicadas aguas arriba. En consecuencia, mientras más cerca de la fuente del arroyo, la muestra representa una zona más limitada y el análisis geoquímico es susceptible tener alta dispersión.

Así entonces mientras más lejos de la fuente, la muestra representa una zona más extensa, de modo que su análisis geoquímico debería ser menos disperso, Fig. III.6. Los datos que no siguen este patrón de dispersión esperado pueden ser vistos como “anómalos”.

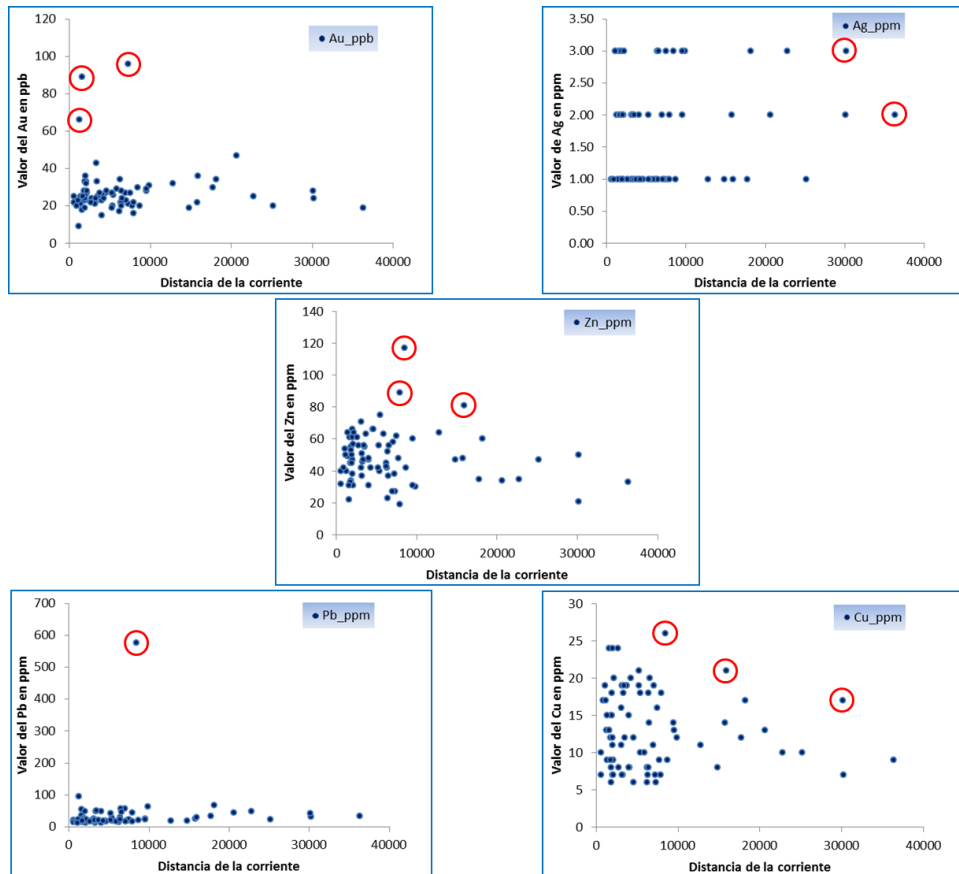


Fig. III.6 Gráficos de Dispersión para el Au, Ag, Pb, Cu y Zn de la zona I Actopan, en base a los muestreos de los sedimentos de arroyo.

Para esta zona se buscó representar de manera gráfica la dispersión por elementos en relación con las corrientes hidrográficas, tomando las variables (Cu, Au, Ag, Pb y Zn).

Las anomalías desarrolladas en estos sedimentos activos pueden extenderse varios cientos de kilómetros con respecto a su fuente y por lo tanto los estudios de estas anomalías se

utilizan frecuente y preferentemente para lograr un reconocimiento general. Tomando en cuenta los análisis geoquímicos de sedimentos de arroyo con información de las corrientes, se realizó un análisis de la zona, verificando y editando minuciosamente los vectores con sus respectivas distancias para corregir y unificar adecuadamente su intersección.

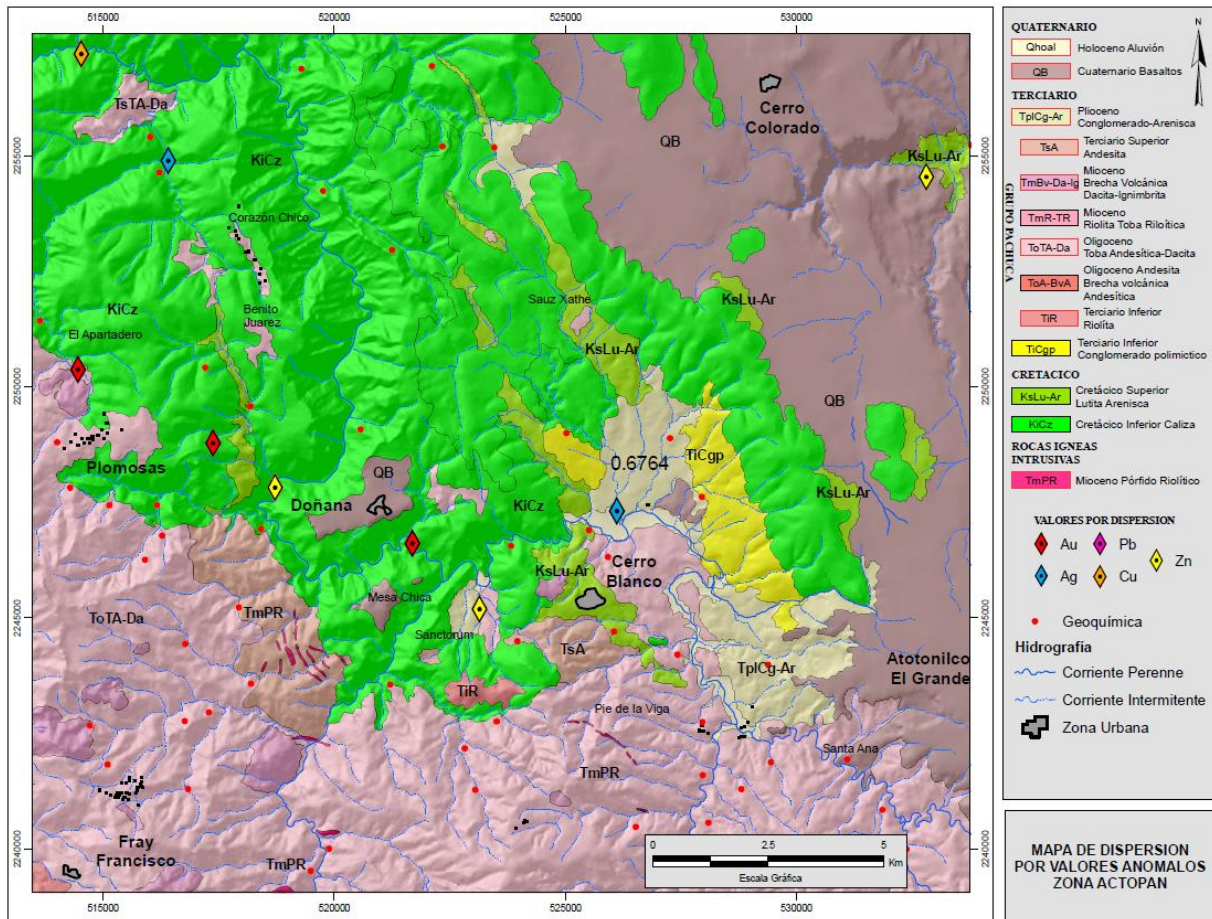


Fig. III.7. Mapa de dispersión por las variables Au, Ag, Pb, Cu, Zn, zona (Actopan).

Una vez realizado este proceso se determinaron las longitudes principales de los afluentes para hacer la suma total de las distancias, que sirvieron para conocer las distancias entre las muestras de sedimentos y los afluentes de las cuencas, visualizando la dispersión de los elementos químicos en función de estas características. Los gráficos de dispersión fueron realizados a partir de las variables Au, Ag, Pb, Cu y Zn respecto a las corrientes (Fig. III.5), en donde se observan datos que se pueden considerar anómalos dentro de los elementos muestreados. Estos datos anómalos marcados en círculos de color rojo en los gráficos de

dispersión, se exportaron a un plano geológico para comparar con las demás variables su ubicación y dispersión de acuerdo a las características representadas Fig. III.7.

III.1.1.4. Análisis en componentes principales

El Análisis en Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante una base de datos con muchas variables, un objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Otro objetivo es tener representaciones sintéticas de los datos en espacios de menores dimensiones, de manera de poder interpretar los datos e identificar datos anómalos. Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales.

Analizando la tabla de datos geoquímicos de sedimentos de arroyo (Au, Ag, Pb, Cu, Zn), para esta zona se realizó el análisis ACP, mediante un software especializado para determinar los factores, determinando tres factores principales que cubren el 81% de la varianza total (Tabla III.3).

Tabla III.3. Valores propios y varianza acumulada de la zona Actopan con las variables Au, Ag, Pb, Cu y Zn

Elemento	Media	St. dev.
Variable 1 Ag_ppm	1.61,	0.79
Variable 2 Au_ppb	27.41,	12.88
Variable 3 Cu_ppm	13.09,	5.16
Variable 4 Pb_ppm	34.86,	63.22
Variable 5 Zn_ppm	48.43,	15.98

Factor	Eigen Valor	% Varianza	% Acumulado
1	2.0383	40.77%	40.77%
2	1.0793	21.59%	62.35%
3	0.9406	18.81%	81.16%
4	0.6672	13.34%	94.51%
5	0.2746	5.49%	100.00%

Elementos	F1	F2	F3
Ag_ppm	0.3741	0.4293	-0.7029
Au_ppb	0.0005	0.781	0.5603
Cu_ppm	0.5743	-0.0882	-0.0399
Pb_ppm	0.5074	0.1944	0.1364
Zn_ppm	0.5222	-0.4003	0.4144

Por lo tanto, considerando estos factores se observaron asociaciones (positivas o negativas) con las variables (Tabla III.4).

Tabla III.4. Factores de correlación de la zona Actopan.

Factor 1 (Positivo)			Factor 2 (Positivo)			Factor 3 (Positivo)		
V3	0.5743	Cu_ppm	V2	0.781	Au_ppb	V2	0.5603	Au_ppb
V5	0.5222	Zn_ppm	V1	0.4293	Ag_ppm	V5	0.4144	Zn_ppm
V4	0.5074	Pb_ppm	Factor 2 (Negativo)			Factor 3 (Negativo)		
V1	0.3741	Ag_ppm	V5	-0.4003	Zn_ppm	V1	-0.7029	Ag_ppm
<hr/> POSITIVA <hr/>								
Factor 1 Cu, Zn, Pb, Ag			Factor de mineralización					
Factor 2 Au, Ag, Zn			Factor de mineralización					
Factor 3 Au, Zn, Ag			Factor de mineralización					
<hr/> NEGATIVA <hr/>								
			Factor 2 -0.4003 Zn_ppm					
			Factor 3 -0.7029 Ag_ppm					

Con los factores de asociación obtenidos se realizó una representación gráfica del mapa base de los factores F1 y F2 para determinar datos anómalos fuera de la nube de dispersión principal (Fig. III.8). Posteriormente se podrá correlacionar estos datos con la información geológica de la zona y determinar las probables áreas anómalas de acuerdo a los datos representados en el mapa combinados con los datos de geología, estructuras, geoquímica, zonas de alteración y vetas, mediante el proceso de análisis jerárquico.

De la misma manera se realizó el procedimiento para el par de factores F1 y F3, determinando los datos atípicos de estos valores, representados con un asterisco en color lila en el mapa base así como en el diagrama de dispersión (Fig. III.9).

Las coordenadas de estos factores fueron calculados mediante el programa ISATIS que genera los datos atípicos en una nube de dispersión y a la vez permite representarlos dentro de un plano con coordenadas X, Y. Estas representaciones son exportadas en un formato de texto para posteriormente representarlos dentro del marco de referencia de la zona de estudio mediante ArcGis, para realizar su interpretación con los datos combinados de geología y los demás factores relacionados de la zona.

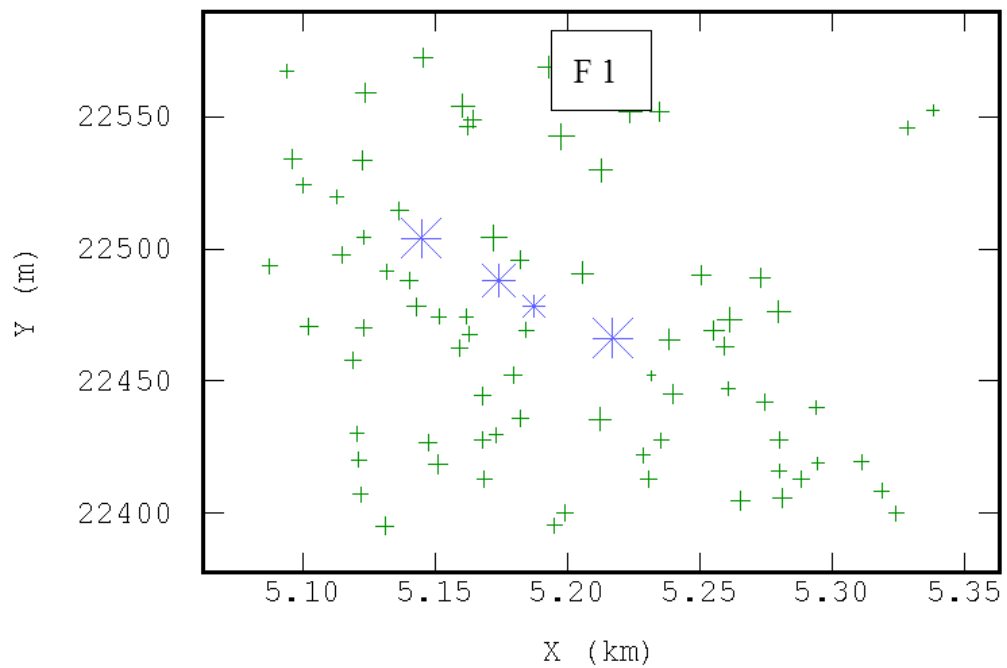
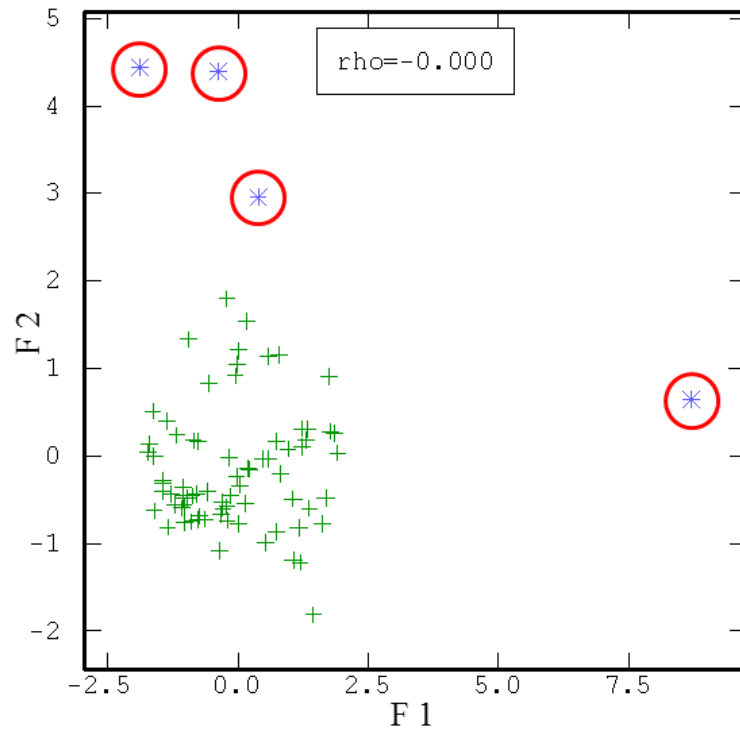


Fig. III.8. Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2. Arriba: Nube de dispersión (F1/F2). Abajo: Mapa con valores atípicos resaltados.

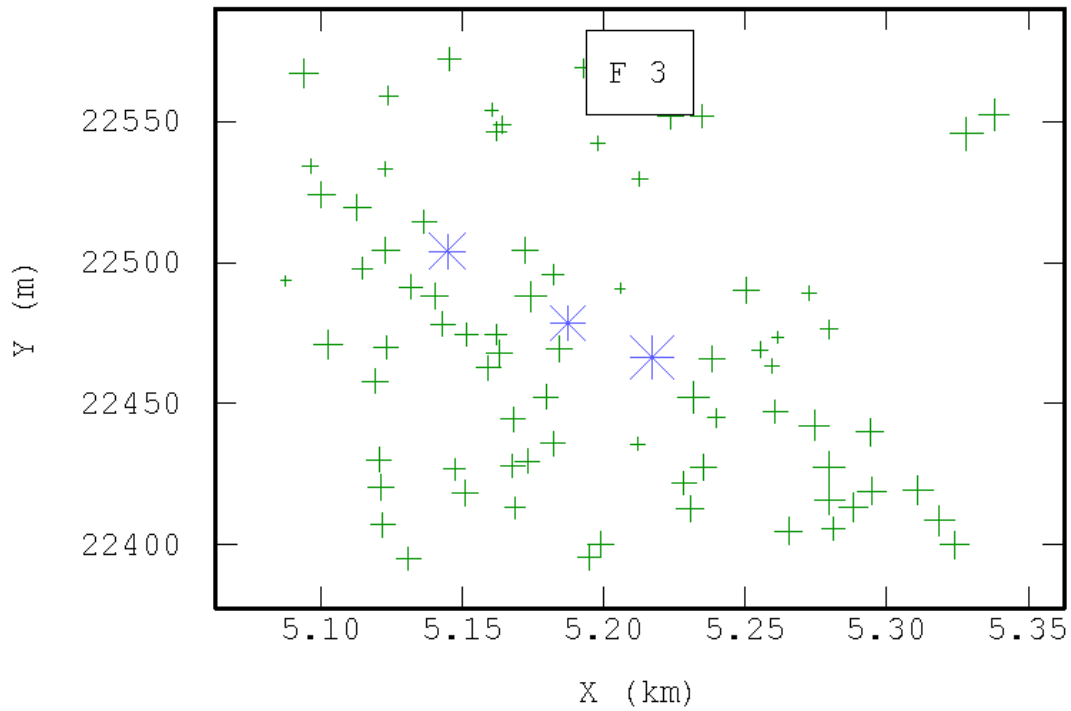
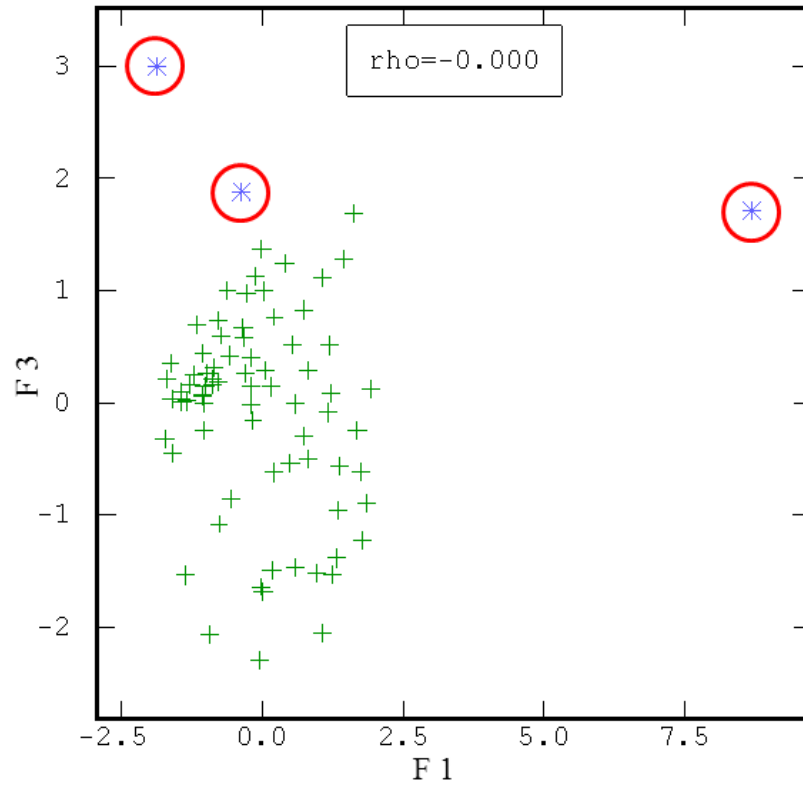


Fig. III.9. Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F3, zona Actopan. Arriba: Nube de dispersión (F1/F3). Abajo: Mapa con valores atípicos resaltados.

Como se puede observar, los datos atípicos de estos tres factores exportados se presentan ubicados dentro la zona (Plomosas, Doñana), Fig. III.10, mostrando un lineamiento con una dirección NW-SE, dentro de las rocas calizas de la Fm. El Doctor, con sus factores de asociación mineralógica.

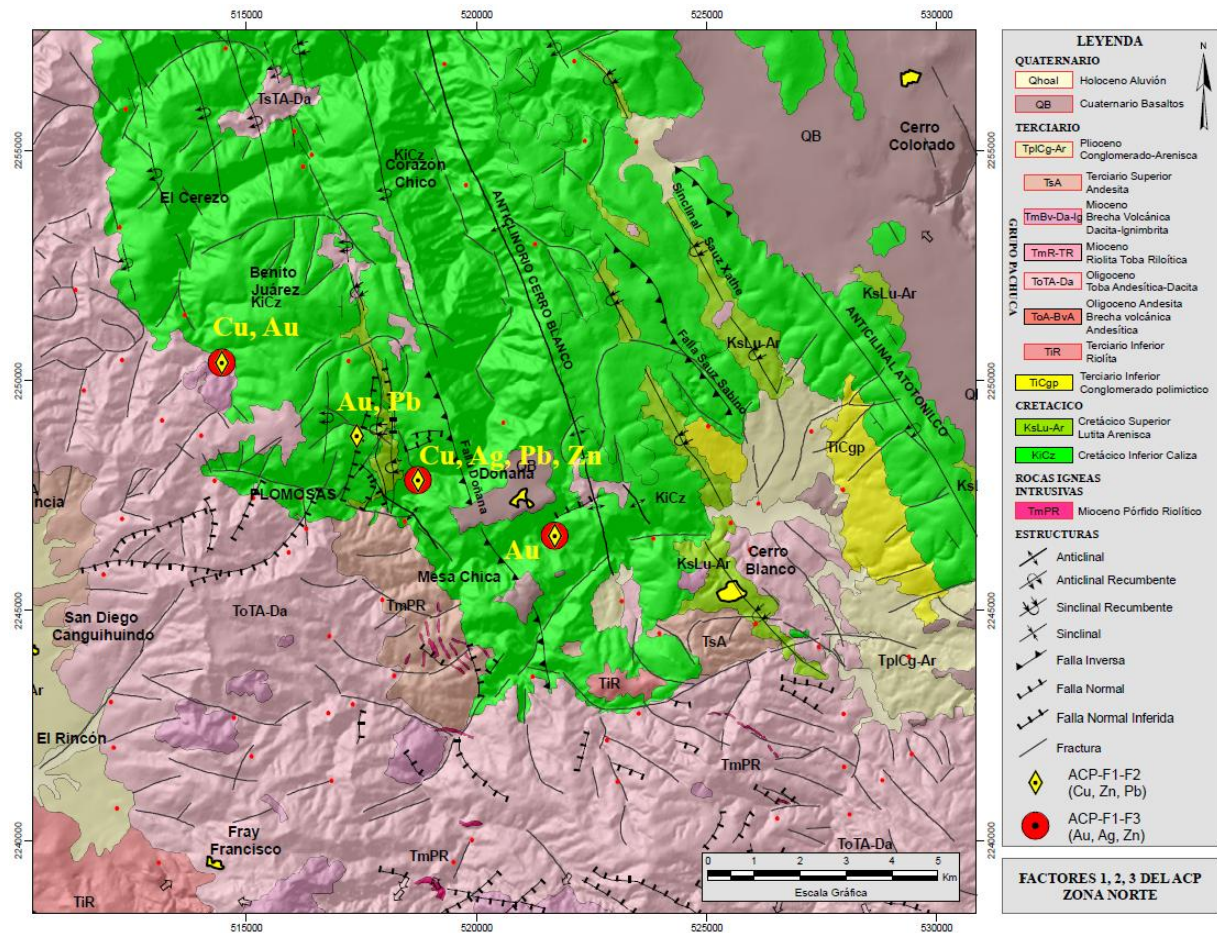


Fig. III.10 Representación de los factores F1, F2, F3 en un plano geológico para la zona Actopan

III.1.1.5. Interpolación Espacial.

Uno de los objetivos principales e inicial de este estudio de análisis espacial fue realizar un análisis con la información geoquímica existente del área, poner de manifiesto en forma complementaria los resultados y mostrar e indicar áreas o zonas prospectivas probables.

Este enfoque requiere que además de la definición de anomalías geoquímicas relacionadas con mineralizaciones, se pongan de manifiesto rasgos geoquímicos indicadores de medios favorables para su formación (Plant y Slater, 1986; Plant y Tarney, 1994a). Para este análisis se graficaron variables de interés por concentración geoquímica (Au, Ag, Pb, Cu y Zn).

Utilizando el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) de ArcGis. Este método permite interpolar muestreos geoquímicos de sedimentos de arroyo, generando un área o buffer de influencia anómala de la variable como se muestra en la Fig. III.11 y III.12, donde los valores representativos se muestran en colores rojos y los menos representativos se muestran en colores azules de acuerdo a una escala de colores como se muestran en cada una de las variables mencionadas anteriormente.

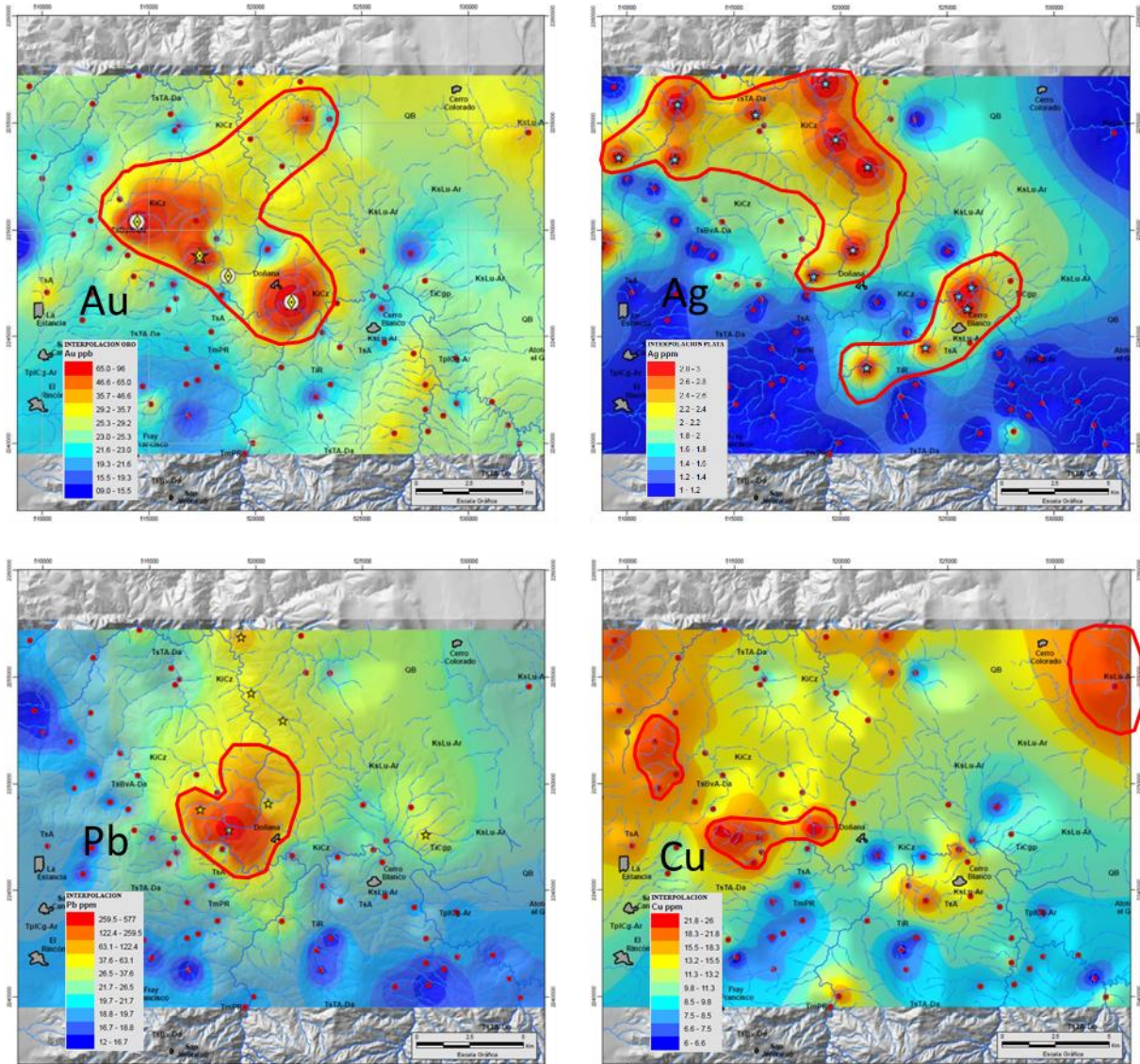


Fig. III.11. Interpolación de las variables Au, Ag, Pb, Cu, usando el método IDW para la zona Actopan.

Esta información será ligada y correlacionada con el resultado del proceso de análisis jerárquico, para determinar las áreas prospectivas o continuación de las ya existentes, mediante el cálculo de pesos determinados y el cruce de los mismos usando ArcGis para las variables especificadas.

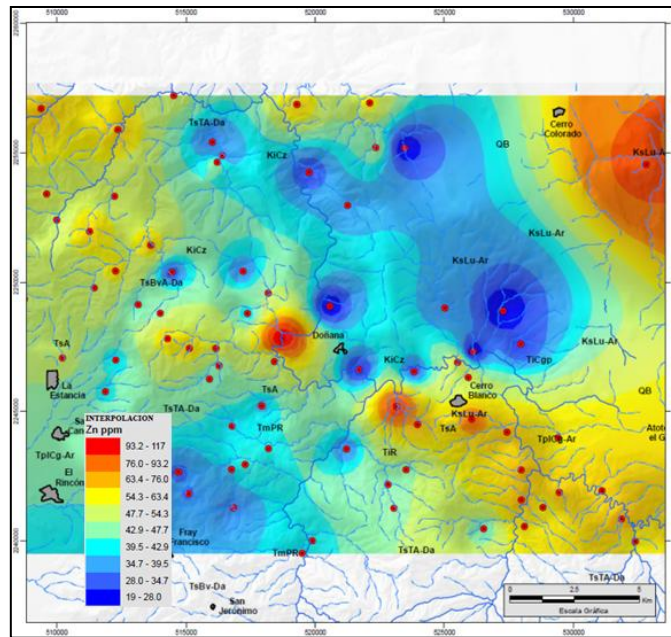


Fig. III.12. Interpolación del Zn, usando el método IDW para la zona Actopan.

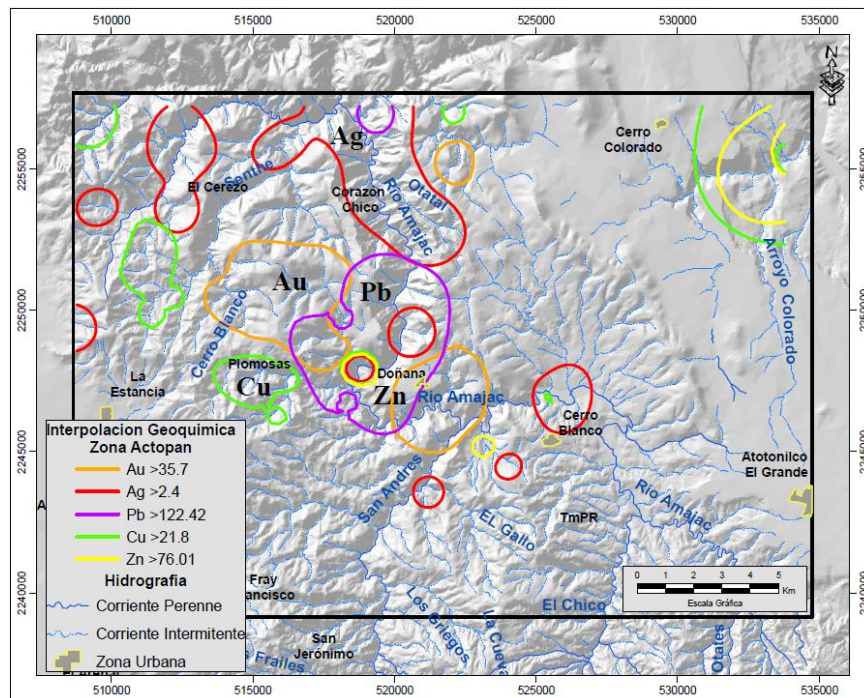


Fig. III.13. Distribución espacial de probables zonas anómalas (Actopan).

En definitiva, los objetivos de este estudio son de tipo exploratorio (delimitación de posibles áreas con interés prospectivo). Para ello, este tipo de análisis es parte de una metodología en la cual se pueda aplicar a cualquier área prospectiva a nivel regional y local del territorio mexicano.

III.1.1.6. Conclusiones

La ubicación de los datos atípicos de la zona I (Actopan), están representados por las variables (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) con mayor promedio dentro del área, observándose su distribución principalmente las zonas de rocas calcáreas de la Fm. Doctor (KicZ), en contacto con las rocas volcánicas del grupo Pachuca, con una dirección NW-SE que parecen seguir el patrón estructural de la zona con ese rumbo. Las frecuencias de los histogramas están correlacionadas con estos datos atípicos dentro de los mapas de despliegue.

La correlación efectuada linealmente determino una correlación significativa entre las variables Zn-Cu, con un rango de 0.746, lo que indica características con tipo de mineralización polimetálica. Estas variables son observadas principalmente en el área de Plomosas, donde se observan minerales de zinc como la esfalerita.

Los gráficos de dispersión nos permiten determinar a partir de las corrientes hidrográficas su distribución y aportación de las cuencas de captación donde probablemente migraron dichas anomalías de los elementos dispersos, estos fueron corroborados espacialmente con los demás factores dentro de un plano georreferenciados con coordenadas X, Y.

Para conocer las asociaciones geoquímicas de las variables en estudio, se efectuó un análisis de componentes principales, para determinar los factores con respuestas de asociaciones mineralógicas positivas observándose las siguientes:

Factor 1: Cu, Zn, Pb, Ag; Factor 2-3: Au, Ag, Zn

Estos factores están considerados como elementos de tipo calcófilos (fase sulfurada), según Goldschmidt (en Rose et al. 1979) y la asociación de los mismos se considera dentro de los depósitos de metales base, por lo que su interés en esta zona es de suma importancia para su análisis. Estos componentes se presentan en la zona de Plomosas dentro de las rocas calcáreas en contacto con las rocas volcánicas.

La interpolación efectuada dentro del área fue determinada en base al tipo de concentración de cada uno de los minerales (Au, Ag, Pb, Cu y Zn) mediante el método Inverso de la Distancia (IDW- Inverse Distance Weighting), considerado como un método sencillo y práctico es empleado en proyectos a escala regional. (Salminen *et al.*, 2004), para conocer la distribución espacial de las variables y su correlación con las estadísticas básicas descritas.

La presencia de los minerales interpolados tiene relación con los factores determinados en zonas específicas, por lo que la correlación entre ellos coincide con áreas donde se presentan anomalías por los elementos indicados.

III.2.1. Zona Pachuca.

Para la interpretación de esta zona II (Pachuca), la base de datos geoquímica fue tomada de la carta Pachuca clave E14-D81 escala 1:50,000 con un total de 103 muestras elaboradas en el año 2005. Tomando en cuenta el drenaje principal de las cuencas y sub-cuencas hidrológicas, se ubicaron los puntos de muestreo sobre las corrientes tributarias, metros antes de su descarga a la corriente troncal o principal en la confluencia de los arroyos (Fig. III.14), apoyándose mediante un posicionador (GPS), para su mejor control.

El tamizado del sedimento recolectado fue elaborado a -80 mallas recolectando el material en bolsas de papel kraft para su análisis. Estas muestras fueron analizadas en los laboratorios del SGM, mediante el método Inductivo de Emisión de Plasma (ICP) por sus siglas en inglés (Inductively Coupled Plasma), los resultados geoquímicos fueron analizados por el Au más 31 elementos (Ag, Al, As, Au, Ba, Be, C, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Zn), mediante el método antes mencionado, que consiste en digerir la muestra sólida en horno de microondas, para pasar a solución acuosa a través de una disolución parcial mediante agua regia.

El Au se analizó mediante el método combinado ensaye-copelación-lectura en absorción atómica, el cual permite bajar los límites de detección hasta 1 ppb. (Texto explicativo Carta Pachuca). De igual manera para esta zona se realizó un estudio exploratorio con las siguientes características que se describen a continuación:

III.2.1.1. Estadísticas Básicas.

Para esta zona de las 103 muestras colectadas y analizadas dentro de la carta Pachuca escala 1:50,000, se hizo el recorte con el límite de la zona de estudio con las coordenadas

en formato UTM 508665 este, 2239151 Norte y 534746 Este, 2225195 Norte, con un total de 55 muestras, con la cual se inició el análisis estadístico con los siguientes procesos:

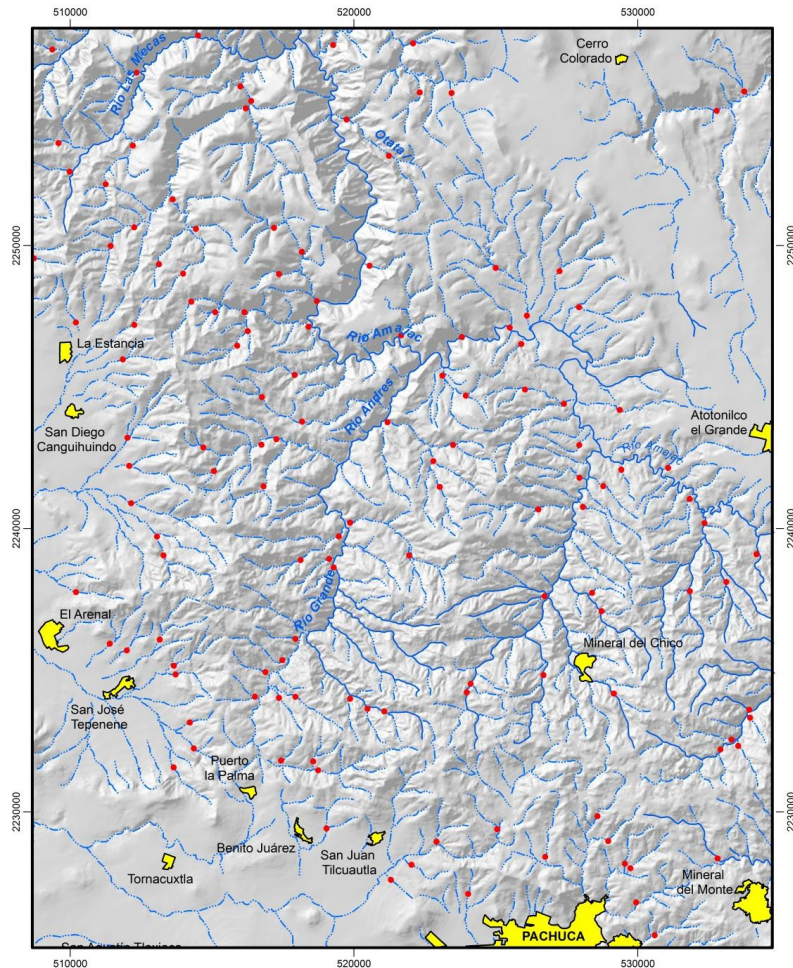


Fig. III.14. Puntos de muestreo de sedimentos sobre la red hidrográfica de la zona de estudio.

a). Estadísticas elementales.

La metodología estadística para los valores de muestreo geoquímico de sedimentos de arroyo de esta zona, se obtuvo de la misma manera que la zona anterior, obteniendo sus estadígrafos y valores principales (Tabla III.5), con el propósito de obtener los patrones de distribución en el área en base a un nivel de fondo (background) y las anomalías probables o posibles y ser graficadas en planos georreferenciados a una escala determinada.

Los parámetros calculados para determinar los valores de las variables y determinar una anomalía geoquímica para cada una de ellas, con un umbral o threshold que rebase el valor

medio de la corteza terrestre se muestran en la tabla III.6, de acuerdo a investigaciones de varios autores, que en algunos casos pueden tener algunas variaciones en los datos. Para este caso se utilizó como parámetro de comparación la tabla elaborada por Levinson (1980).

Tabla III.5. Parámetros estadísticos básicos de la zona sur de estudio (Pachuca)

Elementos	N° de Muestras	Valor Min.	Valor Max.	Rango	Media	Skewness (Sesgo)	Kurtosis (Picos)	Desv. Estandar	Coef. De variación
Ag_ppm	55	0.40	10.60	10.20	1.40	10.44	20.58	1.86	1.33
Al_%	55	1.22	5.01	3.79	2.84	0.92	-1.70	1.10	0.39
As_ppm	55	0.60	7.40	6.80	3.01	1.36	-1.21	1.97	0.65
Au_ppb	55	1.00	43.00	42.00	3.73	14.04	39.46	6.44	1.73
Ba_ppm	55	68.00	425.00	357.00	153.91	4.09	2.64	78.41	0.51
Be_ppm	55	0.30	1.20	0.90	0.70	1.23	-1.23	0.24	0.34
Ca_%	55	0.22	4.30	4.08	0.93	7.07	7.09	1.02	1.09
Cd_ppm	55	0.04	0.31	0.27	0.07	6.68	6.16	0.07	0.97
Co_ppm	55	5.00	28.00	23.00	9.96	8.89	20.20	3.44	0.35
Cr_ppm	55	12.00	100.00	88.00	34.36	5.17	5.81	16.98	0.49
Cu_ppm	55	6.00	26.00	20.00	10.76	3.71	2.88	4.24	0.39
Fe_%	55	1.95	5.47	3.52	2.80	5.01	7.38	0.63	0.22
K_%	55	0.05	0.39	0.34	0.14	4.28	2.43	0.08	0.56
Mg_%	55	0.17	1.23	1.06	0.65	0.91	-0.69	0.24	0.37
Mn_ppm	55	207.00	2477.00	2270.00	428.15	18.15	62.02	301.58	0.70
Na_ppm	55	106.00	715.00	609.00	322.06	3.49	1.71	134.93	0.42
Ni_ppm	55	4.00	34.00	30.00	13.13	3.49	2.05	6.80	0.52
P_ppm	55	171.00	947.00	776.00	478.98	2.13	-0.45	213.03	0.44
Pb_ppm	55	6.00	53.00	47.00	15.96	5.51	6.07	9.49	0.59
Sb_ppm	55	0.60	1.00	0.40	0.61	22.45	83.26	0.05	0.09
Sc_ppm	55	2.00	10.00	8.00	4.98	2.83	1.66	1.58	0.32
Sn_ppm	55	1.00	2.10	1.10	1.16	6.03	5.15	0.28	0.24
Sr_ppm	55	29.00	227.00	198.00	67.20	6.92	11.58	34.62	0.52
Zn_ppm	55	28.00	103.00	75.00	51.18	3.22	1.84	16.23	0.32

Realizando un contraste comparativo entre la tabla III.5 de los parámetros estadísticos de la zona Pachuca y la tabla III.6 de Levinson en relación a su abundancia en la corteza terrestre, se tomó como base la media de los datos del área de estudio y el promedio general en abundancia de la corteza terrestre por lo que la relación de las principales variables (Au, Ag, Pb, Cu, Zn) de la zona de estudio se encuentran entre los permitidos para considerar anómalos estas variables.

Tabla III.6 Promedio de la abundancia de determinados elementos menores y traza de la corteza terrestre en diferentes rocas y suelos en ppm, (Levinson, 1980)

Elemento	Corteza terrestre	Ultramaficas	Basalto	Granodiorita	Granito	Esquisto	Caliza	Suelo
Ag	0.07	0.06	0.1	0.07	0.04	0.05	1	0.1
As	1.8	1	2	2	1.5	15	2.5	1--50
Au	0.004	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	
B	10	5	5	20	15	100	10	2-100
Ba	425	2	250	500	600	700	100	100-3000
Be	2.8		0.5	2	5	3	1	6
Bi	0.17	0.02	0.15		0.1	0.18		
Br	2.5	1	3.6		2.9	4	6.2	
Cd	0.2		0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	1
Ce	60	8	35	40	46	50	10	
Cl	130	85	60		165	180	150	
Co	25	150	50	10	1	20	4	1--40
Cr	100	2000	200	20	4	100	10	5--1000
Cs	3		1	2	5	5		6
Cu	55	10	100	30	10	50	15	2-100
Dy	3	0.59	3	3.2	0.5	5	0.4	
Er	2.8	0.36	1.69	4.8	0.2	2	0.5	
Eu	1.2	0.16	1.27	1.2		1		
F	625	100	400		735	740	330	
Ga	15	1	12	18	18	20	0.06	15
Gd	5.4	0.65	4.7	7.4	2	6	0.6	
Ge	1.5	1	1.5	1	1.5	1.5	0.1	1
Hf	3	0.5	2	2	4	3	0.5	
Hg	0.08		0.08	0.08	0.08	0.5	0.05	0.03
Ho	1.2	0.14	0.64	1.6	0.07	1	0.1	
I	0.5	0.5	0.5		0.5	2.2	1.2	
In	0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	
Ir	0.0004							
La	30	3.3	10.5	36	25	20	6	
Li	20		10	25	30	60	20	5--200
Lu	0.50	0.064	0.20		0.01	0.5		
Mn	950	1300	2200	1200	500	850	1100	850
Mo	1.5	0.3	1	1	2	3	1	2
Nb	20	15	20	20	20	20		
Nd	28	3.4	17.8	26	18	24	3	
Ni	75	2000	150	20	0.5	70	12	5--500
Os	0.0004							
Pb	12.5	0.1	5	15	20	20	8	2--200
Pd	0.004	0.02	0.02		0.002			
Pr	8.2	1.02	3.9	8.5	4.6	6	1	
Pt	0.002	0.02	0.02		0.008			
Rb	90		30	120	150	140	5	20--500
Re	0.0005		0.0005		0.0005			
Rh	0.0004							
Ru	0.0004							
Sb	0.02	0.1	0.2	0.2	0.2	1		5
Sc	16	10	38	10	5	15	5	
Se	0.05		0.05		0.05	0.6	0.08	0.2
Sm	6	0.57	4.2	6.8	3	6	0.8	
Sn	2	0.5	1	2	3	4	4	10
Sr	375	1	465	450	285	300	500	50--1000
Ta	2	1	0.5	2	3.5	2		
Tb	0.9	0.088	0.63	1.3	0.05	1		
Te	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01		
Th	10	0.003	2.2	10	17	12	2	13
Ti	5700	3000	9000	8000	2300	4600	400	5000
Tl	0.45	0.05	0.1	0.5	0.75	0.3		0.1
Tm	0.48	0.053	0.21	0.5		0.2	0.1	
U	2.7	0.001	0.6	3	4.8	4	2	1
V	135	50	250	100	20	130	15	20--500
W	1.5	0.5	1	2	2	2	0.5	
Y	30		25	30	40	25	15	
Yb	3	0.43	1.11	3.6	0.06	3	0.1	
Zn	70	50	100	60	40	100	25	10--300
Zr	165	50	150	140	180	160	20	300

b). Distribución Geoquímica

Los valores anómalos respecto a los demás elementos y su relación geológica, se ubican principalmente en rocas volcánicas del grupo Pachuca (Andesitas, Brechas Andesíticas y Brechas Dacíticas-Ignimbríticas), Fig. III.15. Estos valores analizados son consideran

correctos en cuanto el análisis efectuado en laboratorio y validado por personal especializado en el ramo.

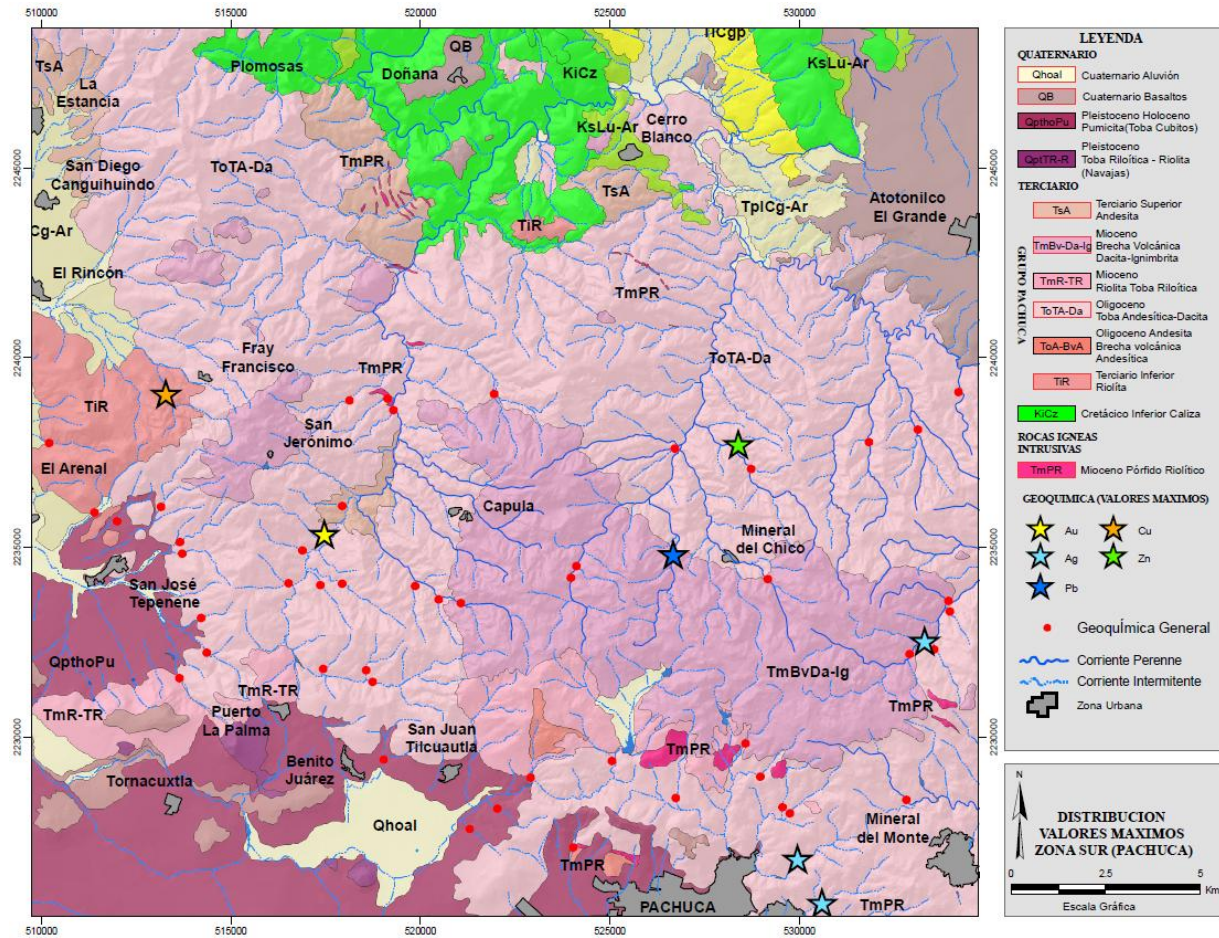


Fig. III.15. Distribución de los valores máximos o anómalos (Au, Ag, Pb, Cu, Zn), zona sur (Pachuca).

c). Distribución Estadística de los Valores (Histogramas).

Las distribuciones estadísticas determinados mediante los histogramas, permitieron representar graficas de frecuencias que ocurren en función del valor de cada uno de los elementos, destacando valores atípicos como el Au, Ag, Pb, Zn. Estos datos fueron exportados con sus coordenadas respectivas mediante un archivo de texto que genera el software ISATIS para poder ubicarlos y representados en un plano espacial para su correlación con los datos geológico mineros usando Arcgis (Fig. III.16).

III.2.1.2. Correlación entre elementos

Para esta zona se realizó el mismo procedimiento que la zona anterior, analizando el muestreo geoquímico, por Au más 31 elementos (Ag, Al, As, Au, Ba, Be, C, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Zn). Normalizando los valores de la tabla y

eliminando los que estuvieran bajo los límites de detección trabajándose con sólo 24 variables, de las cuales los elementos de mayor interés para este análisis están enfocados en 5 elementos (Au, Ag, Pb, Cu y Zn).

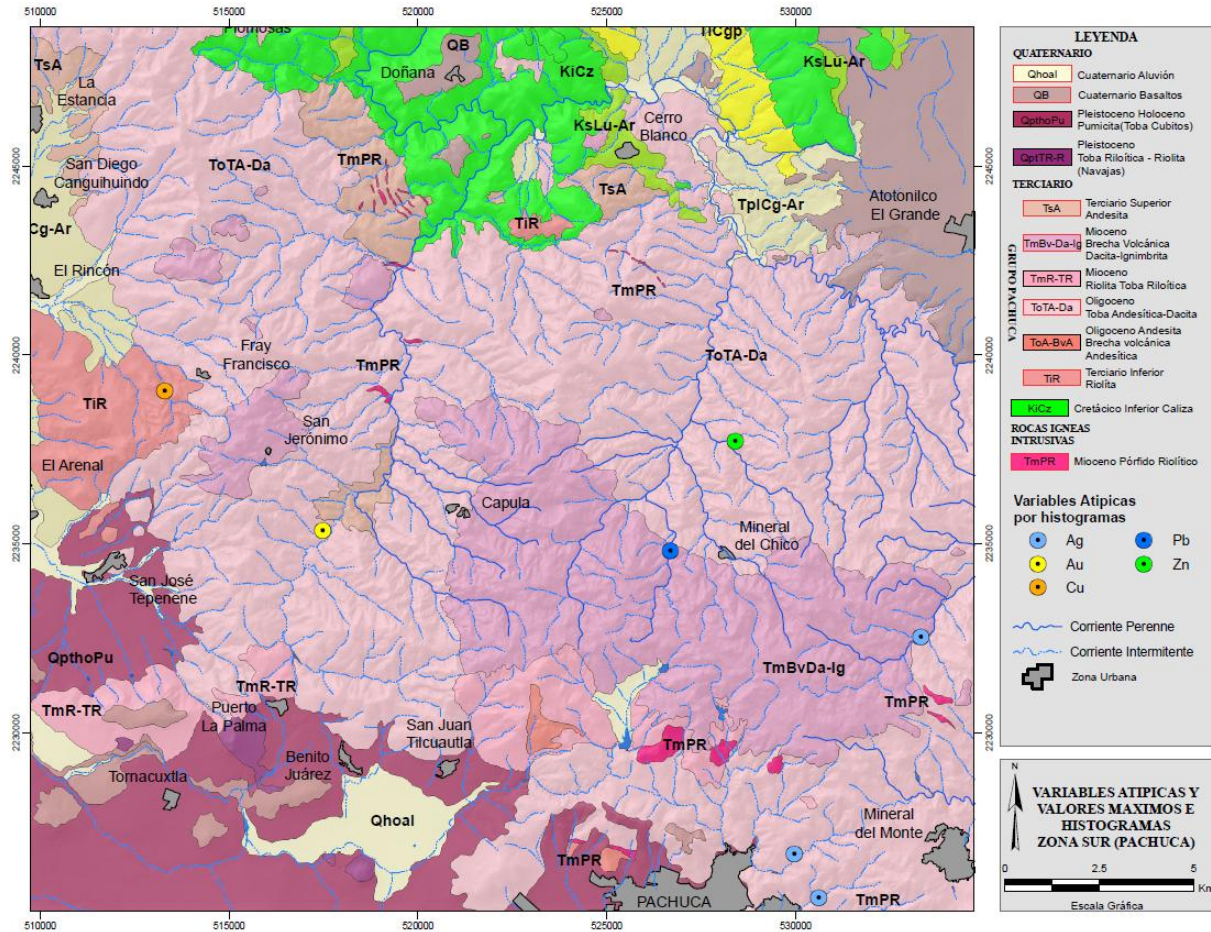


Fig. III.16. Representación de los datos atípicos del Au, Ag, Pb, Zn, en base a los histogramas de la zona sur (Pachuca)

De acuerdo a la matriz de correlación lineal se destacan correlaciones significativas como se muestra en la (Tabla III.7), observándose correlaciones positivas para los siguientes pares:

Pb-Al, Zn-Co, Zn-Cu dentro el rango de (0,6-0,7)

y una correlación moderada para los pares:

Zn-Ag, Pb-Ba, Cu-Be y Zn-Ni dentro del rango (0,5-0,6).

Tabla. III.7. Matriz de correlación para el Au y los demás elementos de la zona II (Área Pachuca)

	Ag_ppm	Al_%	As_ppm	Au_ppb	Ba_ppm	Be_ppm	Ca_%	Cd_ppm	Co_ppm	Cr_ppm	Cu_ppm	Fe_%	K_%	Mg_%	Mn_ppm	Na_ppm	Ni_ppm	P_ppm	Pb_ppm	Sb_ppm	Sc_ppm	Sn_ppm	Sr_ppm	Zn_ppm
Ag_ppm																								
Al_%	0.1743																							
As_ppm	-0.3028	-0.6548																						
Au_ppb	0.0385	-0.0432	0.0715																					
Ba_ppm	0.1248	0.7067	-0.4962	-0.0085																				
Be_ppm	0.0972	0.7243	-0.5804	-0.0393	0.6477																			
Ca_%	-0.1206	-0.1391	0.2754	-0.1685	-0.1847	-0.29																		
Cd_ppm	-0.202	0.2135	-0.4824	0.0253	0.2538	0.4657	-0.2224																	
Co_ppm	0.1905	0.0712	-0.2732	-0.0782	0.0925	0.09	-0.1114	0.2671																
Cr_ppm	0.2799	0.2038	-0.3993	-0.1239	0.0144	0.1216	-0.1562	-0.0132	0.6022															
Cu_ppm	0.2013	0.4104	-0.5524	0.0396	0.2433	0.5223	-0.2388	0.4722	0.357	0.4717														
Fe_%	0.1456	-0.0549	-0.2781	-0.127	-0.0116	0.1084	-0.1049	0.2937	0.8286	0.6013	0.4652													
K_%	-0.0767	0.4613	-0.0201	-0.1734	0.4828	0.2643	0.265	-0.1367	-0.1748	-0.2678	-0.1947	-0.3509												
Mg_%	0.167	0.0312	0.0241	-0.1598	-0.1544	-0.2952	0.5333	-0.4217	0.2063	0.475	-0.0278	0.1715	0.0842											
Mn_ppm	0.0583	0.0687	-0.2785	-0.0354	0.1895	0.2038	0.098	0.475	0.7758	0.1182	0.2236	0.6574	-0.0702	-0.0529										
Na_ppm	-0.013	0.1384	0.0258	-0.14	0.0293	-0.0319	0.3495	-0.0506	0.0579	0.0305	0.0277	-0.0049	0.4039	0.3773	0.0574									
Ni_ppm	0.3653	0.2179	-0.2658	-0.08	0.0517	0.1365	-0.0702	-0.1064	0.6656	0.8672	0.4017	0.5241	-0.1087	0.4358	0.2018	-0.0192								
P_ppm	0.1804	0.1624	-0.2092	0.1207	0.2169	0.209	0.3466	0.2763	0.1035	0.2469	0.3189	0.1245	-0.1903	0.2264	0.1877	0.0137	0.2321							
Pb_ppm	0.0877	0.6427	-0.4041	0.1383	0.5188	0.4674	-0.0961	0.36	-0.0686	-0.0628	0.1764	-0.273	0.3667	-0.2011	0.054	-0.0116	0.0486	0.3362						
Sb_ppm	-0.0738	-0.0132	-0.0983	-0.0582	-0.0436	0.0564	-0.072	-0.0633	0.0812	0.264	0.1371	0.2478	-0.0682	0.1104	0.0104	-0.0693	0.0984	-0.0322	-0.1297					
Sc_ppm	0.1887	0.2751	-0.3718	-0.2279	0.0886	0.2204	0.073	0.1481	0.7144	0.7543	0.5018	0.6812	-0.0047	0.5556	0.3979	0.2683	0.7066	0.1221	-0.1	0.1753				
Sn_ppm	-0.212	-0.3207	0.4474	0.0459	-0.3788	-0.246	0.3729	-0.2666	-0.2286	-0.2209	-0.4292	-0.2246	0.1131	0.0612	-0.1117	0.2231	-0.1838	-0.1064	-0.1542	-0.0779	-0.1305			
Sr_ppm	-0.0386	0.3428	-0.0992	-0.1258	0.4932	0.1994	0.4829	-0.0571	-0.0358	-0.0226	-0.0799	-0.1227	0.4352	0.3716	0.073	0.3039	0.041	0.2986	0.1977	-0.1039	0.1726	0.0889		
Zn_ppm	0.4097	0.4858	-0.6328	0.1316	0.4088	0.4982	-0.14	0.4454	0.6555	0.4533	0.6376	0.5489	-0.0373	0.0213	0.6177	-0.0303	0.5397	0.4494	0.4576	0.0831	0.4799	-0.403	0.0149	

Tomando en cuenta que el análisis prioriza los elementos Au, Ag, Pb, Cu y Zn se tomaron como base los parámetros de correlación lineal como se muestra en la. Tabla III.8.

Tabla III.8. Correlación lineal entre elementos de la zona Pachuca

Correlación (+) Representativa				Correlación (-) Representativa	
0,8 - 0,9	0,7 - 0,8	0,6 - 0,7	0,5 - 0,6	-0.7 - -0.6	0,5 - 0,6
Fe-Co	Ba-Al	Pb-Al	Zn-Ag	As-Al	Be-As
Ni-Cr	Be-Al	Be-Ba	Pb-Ba	Zn-As	Cu-As
	Mn-Co	Ni-Co	Cu-Be		
	Sc-Co	Zn-Co	Mg-Ca		
	Sc-Cr	Zn-Cu	Sc-Mg		
	Sc-Ni	Mn-Fe	Zn-Ni		
		Sc-Fe	Zn-Ag		

Correlación (+) Representativa		Correlación (-) Representativa	
0,6 - 0,7	0,5 - 0,6	-0.7 - -0.6	0,5 - 0,6
Pb-Al	Zn-Ag	Zn-As	Cu-As
Zn-Co	Pb-Ba		
Zn-Cu	Cu-Be		
	Zn-Ni		

Los principales elementos como el Pb, Zn, Cu, Ag, que se asocian en estas correlaciones están considerados dentro de los elementos calcófilos, por su fuerte afinidad con el azufre y débil por el oxígeno por lo que se consideran elementos metálicos y se pueden encontrar en estado nativo pero restringidos a ambientes que carecen de azufre.

Estos elementos podrían estar relacionados con la posible mineralización de la zona de estudio. Los demás elementos que se correlacionan con estos se consideran de tipo litófilos y siderófilos. También podemos observar una correlación negativa de Zn-As dentro del rango (-0.7 - -0.6) y el par Cu-As con un rango de (0,5 - 0,6).

III.2.1.3. Nubes de dispersión.

Para determinar los gráficos o nubes de dispersión de esta zona se realizó la misma metodología de la zona Actopan con cinco elementos (Au, Ag, Pb, Cu, y Zn), para determinar

valores de dispersión para cada elemento (Fig. III.17), tomando como base las corrientes hidrográficas y su distribución a lo largo de las corrientes.

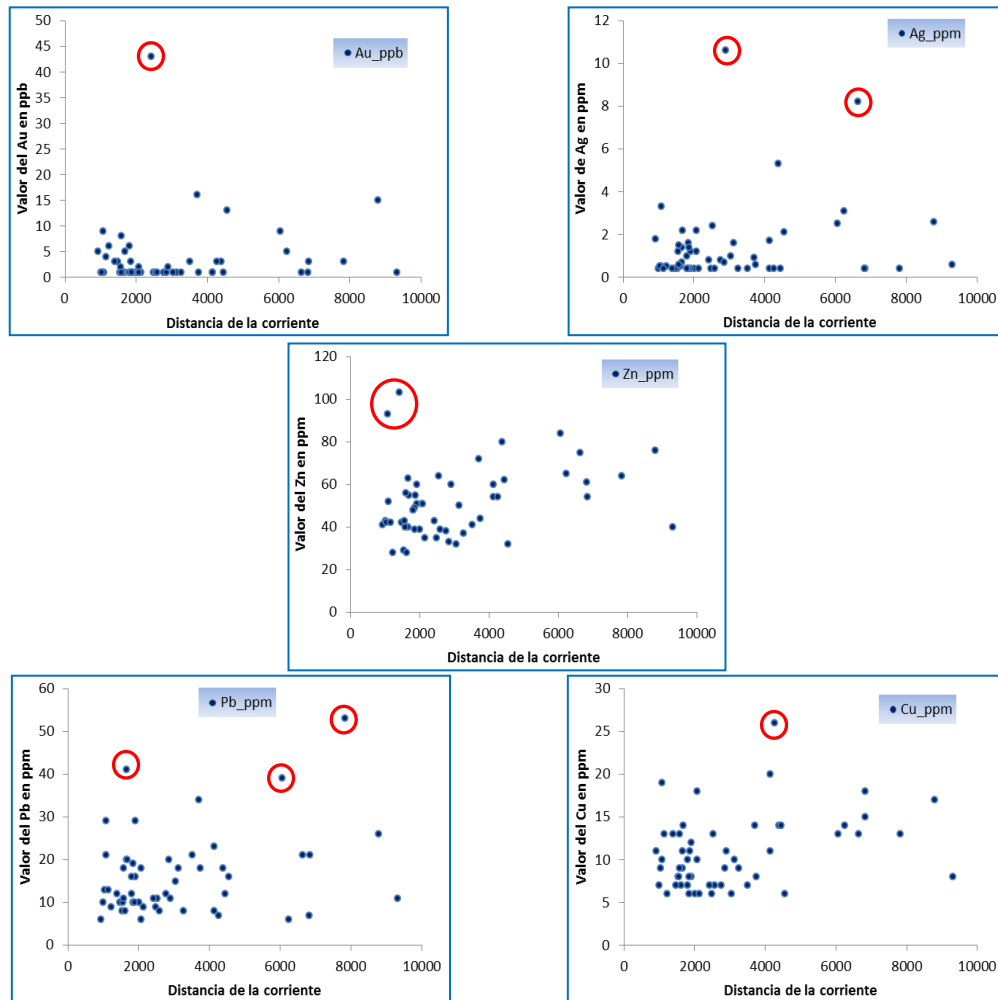


Fig. III.17 Nube de dispersión del Au, Ag, Pb, Cu y Zn de la Zona II Pachuca

Analizando la dispersión de cada elemento respecto a las corrientes, se puede observar valores que se destacan de los demás muestreos y se pueden considerar posiblemente anómalos. Estos datos anómalos se representaron en mapa geológico con coordenadas X, Y, para ver su ubicación de acuerdo a las graficas de dispersión (Fig. III.18).

III.2.1.4. Análisis en componentes principales.

Para obtener el análisis de factores se trabajó la tabla de los muestreos geoquímicos de sedimentos de arroyo (Tabla III.9), determinándose por el método de análisis de componentes principales 24 factores que explican el 100% de la varianza del sistema y de la cual se redujeron a 6 factores cuyos valores son mayores a 1 y que explican el 74.31 % de la

varianza total acumulada de las variables (Au, Ag, Pb, Cu, Zn, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Sb, Sc, Sn, Sr.).

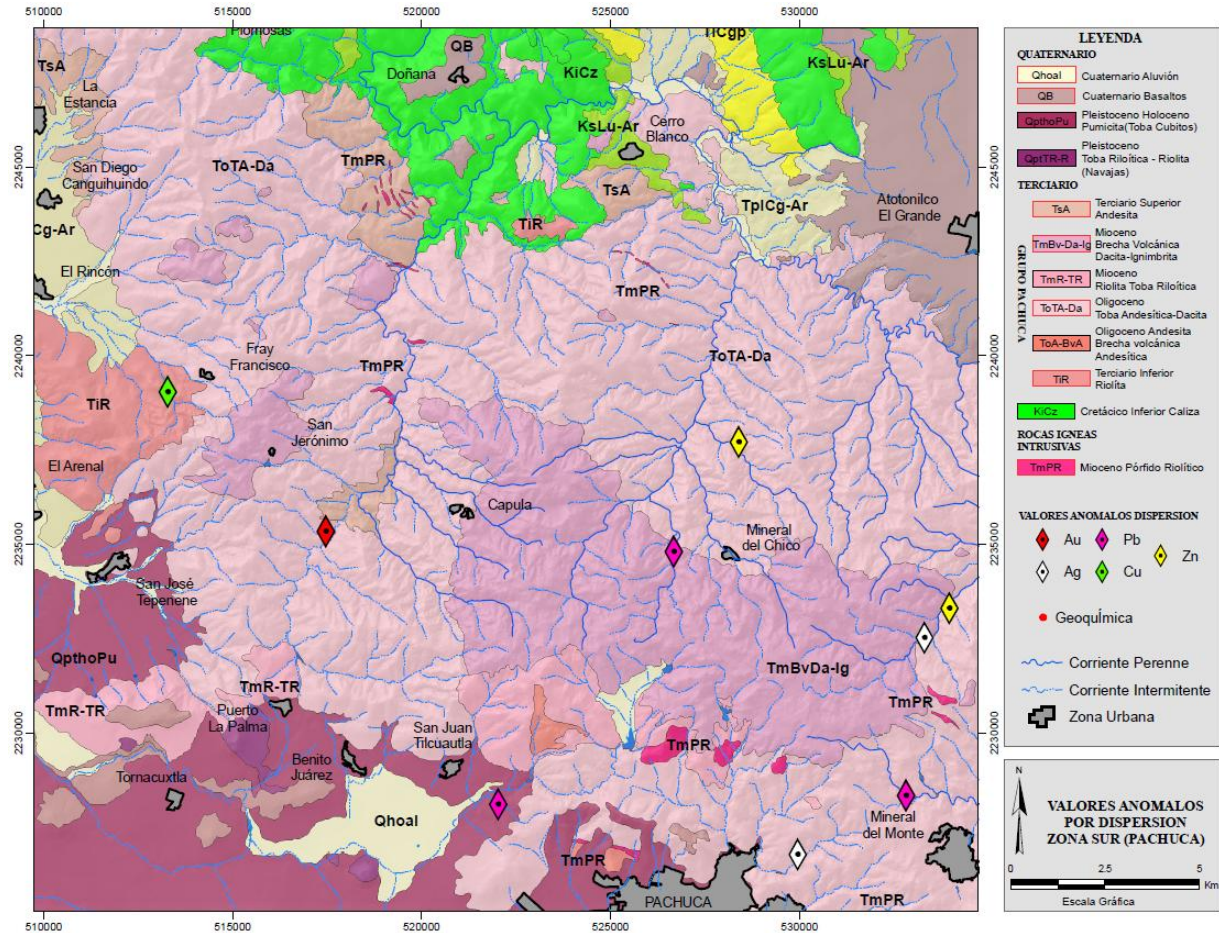


Fig. III.18. Mapa de dispersión por las variables Au, Ag, Pb, Cu, Zn, de la zona II (Pachuca)

Los coeficientes usados para ponderar las variables y concluir los factores se muestran en la Tabla III.10, remarcado en color negro los valores superiores a 0.25 en valor absoluto, para determinar las asociaciones de las variables para cada uno de los factores.

Considerando los factores antes mencionados se observaron asociaciones positivas y negativas de elementos que pueden reflejar procesos litológicos o de mineralización.

Basándose en estos factores se obtuvieron las siguientes asociaciones, como se muestra en la Tabla III.11 y III.12.

Tabla III.9. Valores propios y varianza acumulada.

Factor	Eigen valor	%Varianza	%Acumulado
1	6.4516	26.88%	26.88%
2	3.8237	15.93%	42.81%
3	3.0219	12.59%	55.40%
4	1.8322	7.63%	63.04%
5	1.5455	6.44%	69.48%
6	1.16	4.83%	74.31%
7	0.9481	3.95%	78.26%
8	0.9173	3.82%	82.08%
9	0.7786	3.24%	85.33%
10	0.7173	2.99%	88.32%
11	0.6232	2.60%	90.91%
12	0.4746	1.98%	92.89%
13	0.4196	1.75%	94.64%
14	0.2514	1.05%	95.69%
15	0.2167	0.90%	96.59%
16	0.2101	0.88%	97.47%
17	0.1725	0.72%	98.18%
18	0.1171	0.49%	98.67%
19	0.1006	0.42%	99.09%
20	0.0655	0.27%	99.36%
21	0.054	0.23%	99.59%
22	0.0449	0.19%	99.78%
23	0.035	0.15%	99.92%
24	0.0188	0.08%	100.00%

Las asociaciones positivas para el factor 5 son indicativas de mineralización y los demás factores se consideran de tipo litológico. En las asociaciones negativas se observa al factor 2 y factor 5 como indicadores de mineralización, como se observa en la (Tabla III.11), mientras que los factores 3, 4, 6, se consideran litológicos.

Los elementos de estos factores (Pb, Ag, Au, Sb, Cd) están considerados dentro de los elementos Calcófilos con una afinidad por el azufre formadores de sulfuros y que son elementos indicadores y guías en la prospección geoquímica.

Tabla III.10. Principales factores y su relación con las variables originales.

Elementos	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ag_ppm	0.140	0.043	-0.020	-0.322	-0.258	0.422
Al_%	0.230	-0.311	-0.162	-0.182	0.100	0.002
As_ppm	-0.292	0.164	-0.044	0.100	-0.052	0.098
Au_ppb	-0.024	-0.066	0.159	-0.014	-0.425	0.144
Ba_ppm	0.190	-0.341	-0.118	-0.027	0.094	0.101
Be_ppm	0.233	-0.302	0.020	-0.014	0.136	-0.121
Ca_%	-0.081	0.095	-0.411	0.275	-0.227	-0.156
Cd_ppm	0.185	-0.170	0.217	0.404	0.011	-0.225
Co_ppm	0.284	0.242	0.033	0.209	0.099	0.287
Cr_ppm	0.267	0.259	-0.049	-0.272	-0.003	-0.123
Cu_ppm	0.291	-0.020	0.116	-0.051	-0.036	-0.279
Fe_%	0.261	0.285	0.104	0.199	0.128	0.014
K_%	-0.016	-0.255	-0.356	0.001	0.294	0.211
Mg_%	0.059	0.263	-0.403	-0.153	-0.110	-0.104
Mn_ppm	0.220	0.077	0.042	0.511	0.039	0.254
Na_ppm	0.014	0.023	-0.353	0.146	0.153	0.029
Ni_ppm	0.262	0.231	-0.093	-0.243	-0.071	0.134
P_ppm	0.154	-0.037	-0.116	0.126	-0.588	-0.312
Pb_ppm	0.132	-0.359	-0.058	-0.019	-0.204	0.061
Sb_ppm	0.058	0.109	0.045	-0.130	0.224	-0.498
Sc_ppm	0.284	0.233	-0.173	-0.004	0.176	-0.041
Sn_ppm	-0.190	0.086	-0.172	0.190	-0.039	0.041
Sr_ppm	0.050	-0.133	-0.428	0.113	-0.059	-0.074
Zn_ppm	0.349	-0.041	0.051	0.080	-0.181	0.142

El Au y el P se consideran como elementos Siderófilos que presentan una débil afinidad por el azufre y por el oxígeno y son elementos que se pueden encontrar en estado nativo. Los demás elementos (K, Be, Al, Ba, Ca), se consideran de tipo Litófilos que tienen una fuerte afinidad por el oxígeno y son raramente encontrados en estado nativo.

Tabla III.11. Asociaciones positivas entre factores y variables de la zona Pachuca

POSITIVA		
Factor 1	Fe, Ni, Cr, Sc, Co, Cu, Zn	Factor litológico
Factor 2	Cr, Mg, Fe	Factor litológico
Factor 4	Ca, Cd, Mn	Factor litológico
Factor 5	Mn, Co, Ag	Factor de mineralización

Tabla III.12. Asociaciones negativas entre factores y variables de la zona Pachuca.

Factor 2	K, Be, Al, Ba, Pb	Factor de mineralización
Factor 3	Na, K, Mg, Sr	Factor litológico
Factor 4	Cr, Ag	Factor litológico
Factor 5	Ag, Au, P	Factor de mineralización
Factor 6	Cu, P, Sb	Factor litológico

Tomando en cuenta los factores determinados se utilizó el software ISATIS para generar los gráficos de los ACP para los factores F1, F2, F3, los datos que se alejan de la población normal se consideran elementos atípicos mostrándose en graficas de nubes de dispersión, así mismo estos elementos son representados en un mapa base con coordenadas métricas en UTM como se muestra en la (Fig. III.19 y III.20).

Una vez visto los factores mencionados, estos son exportados en un archivo de texto con sus coordenadas respectivas para ser ubicados dentro del mapa espacial usando ArcGis y ser combinados dentro de un plano geológico para observar la relación que existen en base a su ubicación con las demás variables representadas en el área de estudio (Fig. III.21).

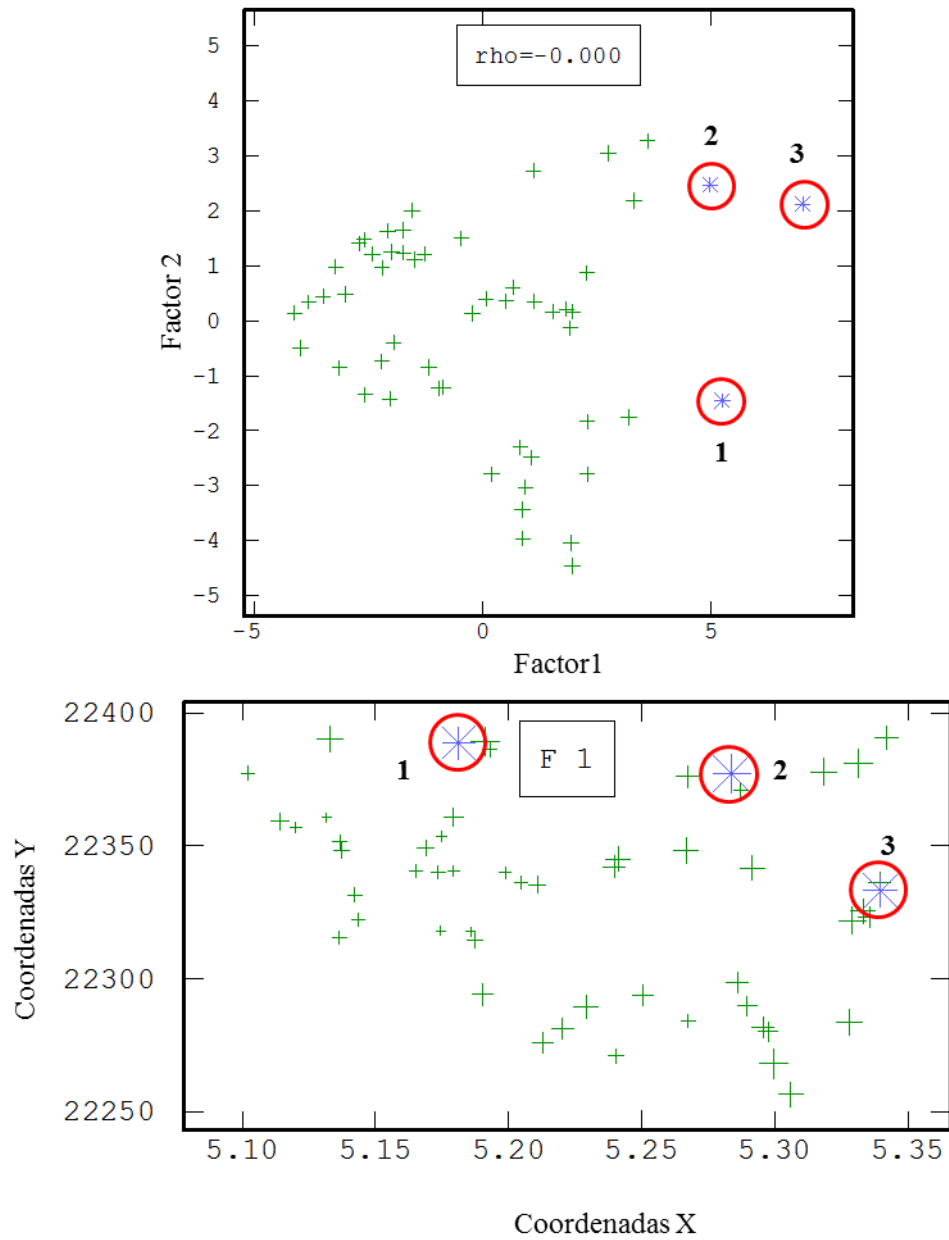


Fig. III.19 Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2 zona Pachuca. Arriba: Nube de dispersión (F1/F2). Abajo: Mapa con valores atípicos

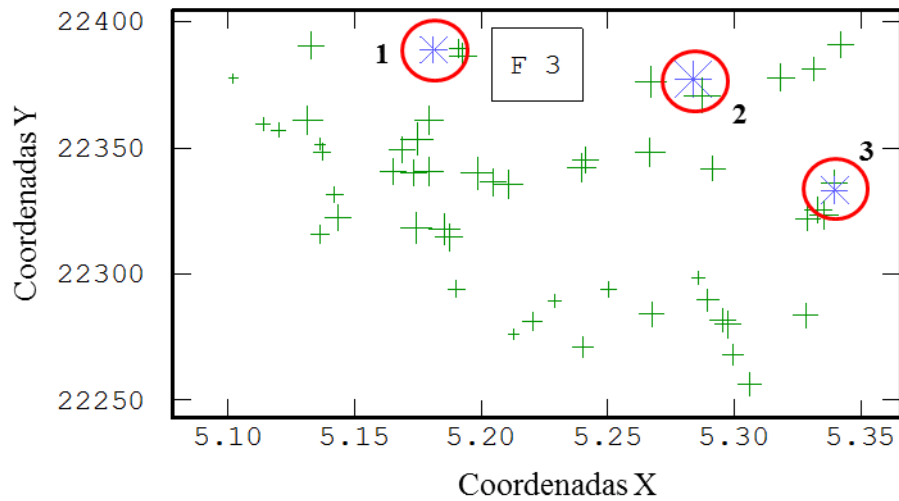
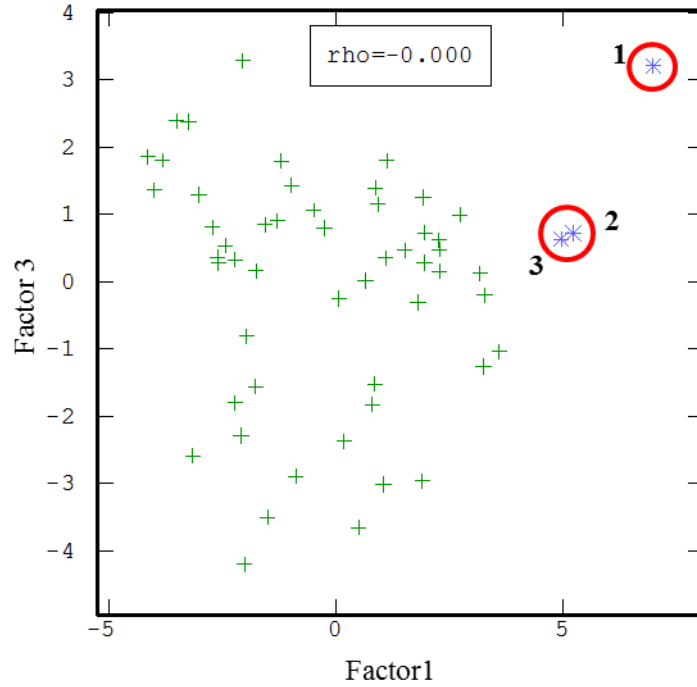


Fig. III.20 Representación gráfica del análisis en componentes principales del par de factores F1 y F2 zona Pachuca. Arriba: Nube de dispersión (F1/F2). Abajo: Mapa con valores atípicos.

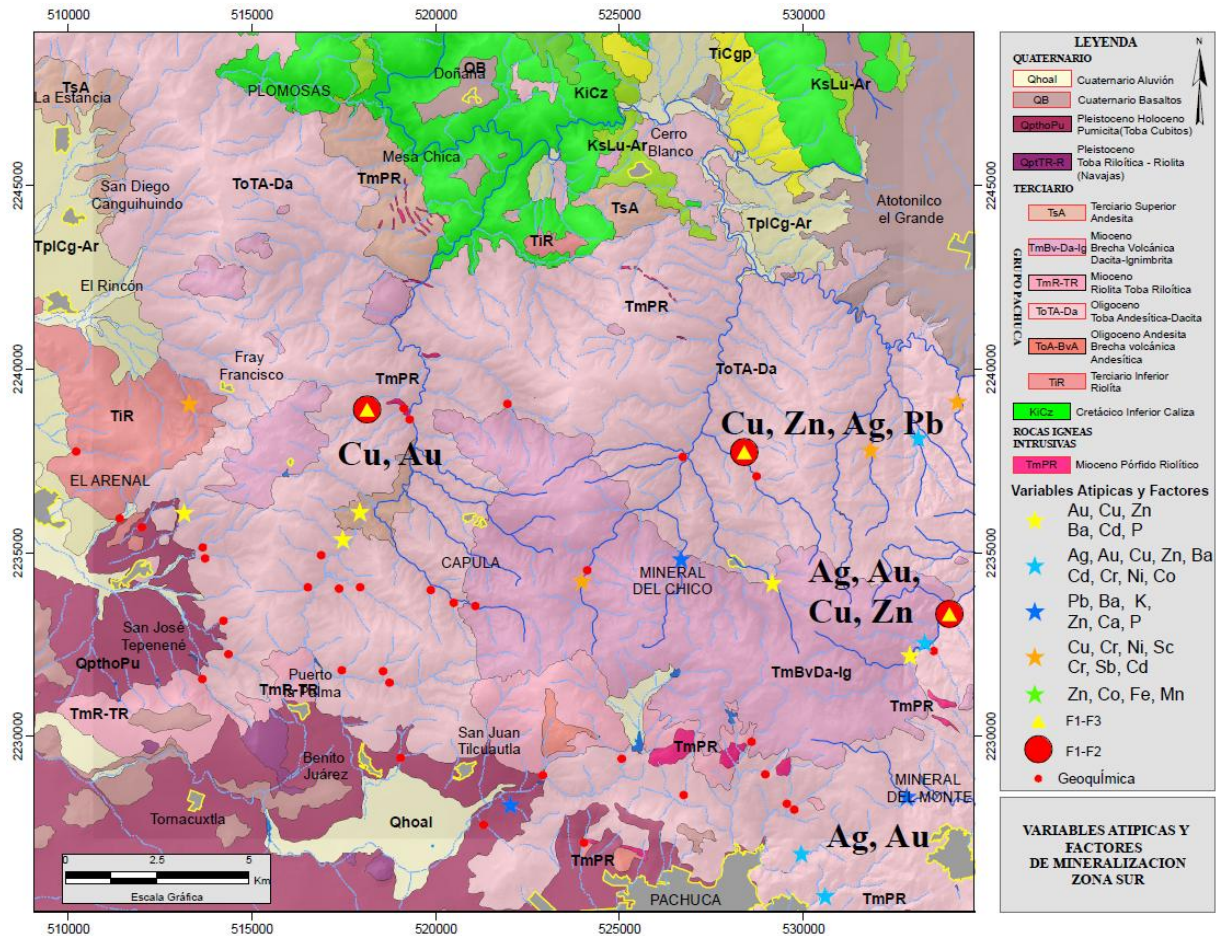


Fig. III.21. Representación en un plano geológico de los factores F1, F2, F3 y las variables atípicas de la zona Pachuca.

III.2.1.5. Interpolación Espacial.

Para esta zona se efectuaron interpolaciones con las variables (Ag, Au, Pb, Cu, Zn), con un total de 55 muestras de sedimentos geoquímicos de arroyo. Usando el software Arcgis para este proceso y el método IDW, para obtener los isovalores para cada una de las variables, utilizando el mismo procedimiento que la zona anterior.

Las representaciones de los mapas de interpolación se presentan en la Fig. III.22 y III.23, para el, Au, Ag, Pb, Cu y Zn observando en cada uno de ellos, los valores de concentración altos en colores rojos y los valores bajos en color azul de acuerdo a una escala representativa en cada una de las variables representando posibles áreas de interés anómalas para cada una de las áreas de la zona de estudio. Así mismo se representó la distribución espacial mediante isovalores para cada una de estas variables delimitando las zonas representativas de los datos atípicos como se observa en la Fig. III.24

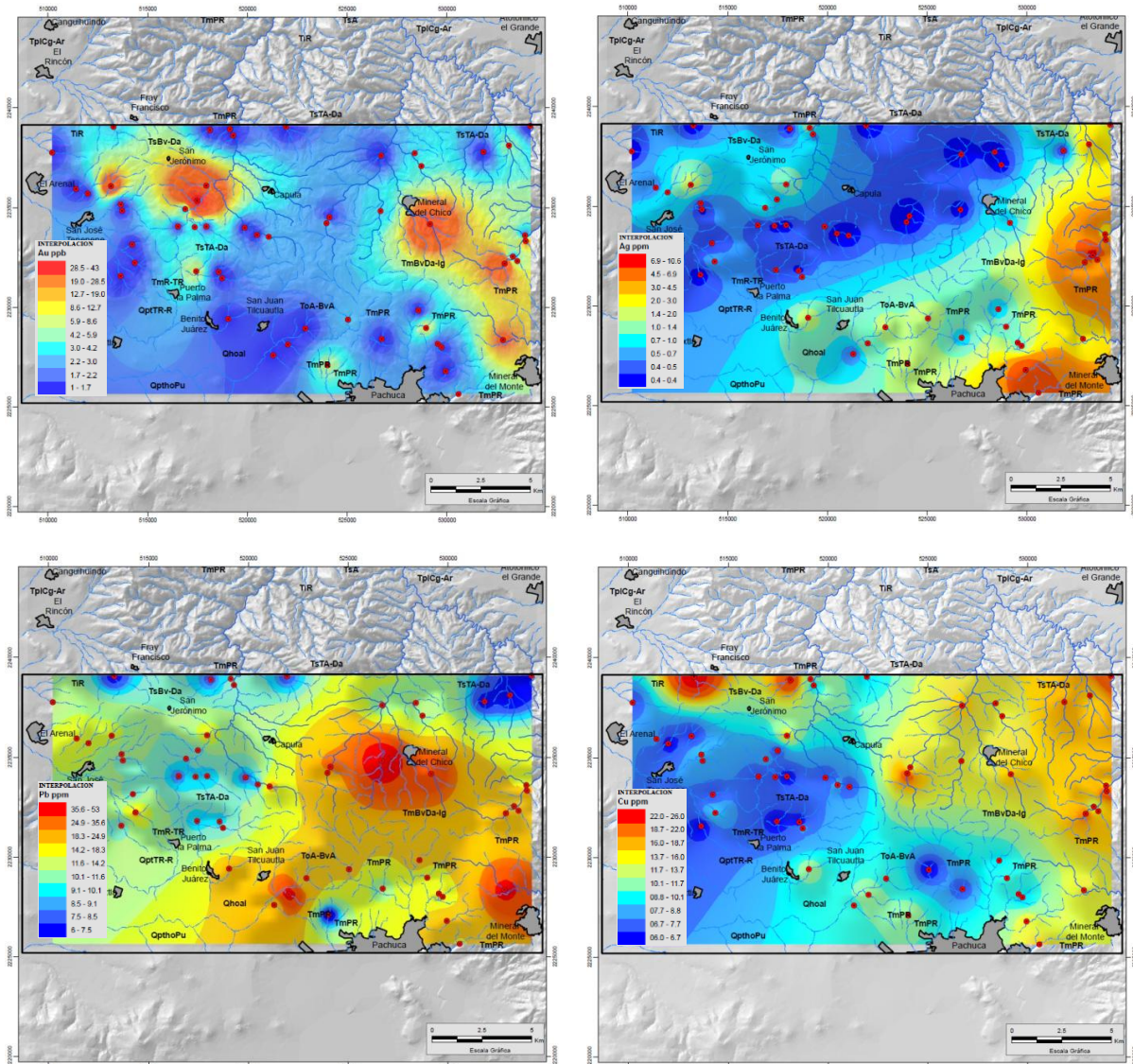


Fig. III.22. Interpolación de las variables Au, Ag, Pb, Cu, usando el método IDW para la zona Pachuca.

III.2.1.6. Conclusiones

En cada uno de los gráficos se representaron mapas de despliegue ubicando los valores altos en base a su distribución, observándose datos atípicos principales que se ubican principalmente en rocas volcánicas del grupo Pachuca (Fm. Vizcaína TsTA-Da) representados por las variables (Au, Ag, Pb, Cu, Zn).

Mediante los histogramas realizados se pudieron determinar frecuencias con elementos atípicos para cada una de las variables en base a la distribución de las mismas, estos valores se representaron dentro de un plano espacialmente georeferenciada observando coincidencia respecto a los datos anómalos del mapa de despliegue principal.

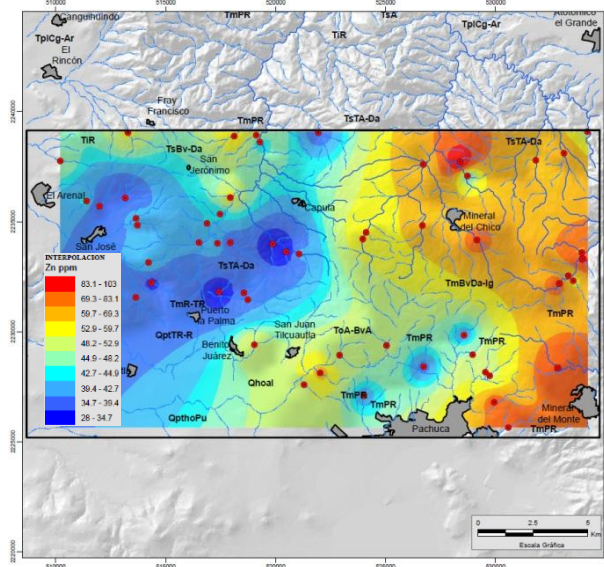


Fig. III.23. Interpolación de la variable Zn, usando el método IDW para la zona Pachuca.

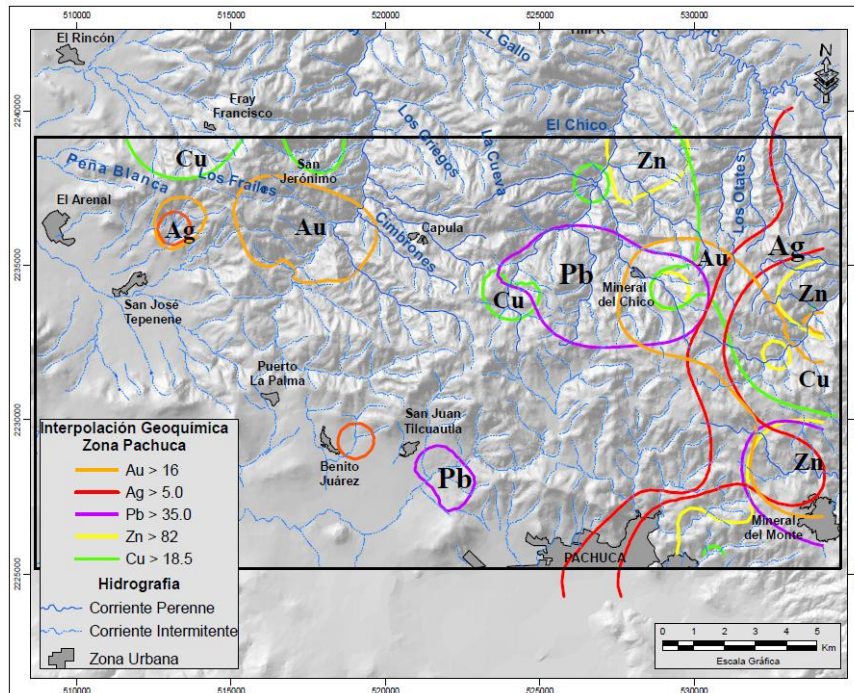


Fig. III.24. Zonas anómalas con isovalores de las variables zona Pachuca.

Los datos fueron analizados a través de técnicas estadísticas, mediante una matriz de correlación lineal, que resume posibles relaciones entre pares de variables (elementos) medido por un coeficiente de correlación (r), cuyo valor oscila entre -1, 0, +1, si la tendencia es hacia 0 indica pobre-nula correlación entre ellas. Esto significa que si la correlación entre pares de elementos es fuerte ($r > 0.5$) pudiese utilizarse uno de ellos como guía para buscar el otro, esto bajo la premisa de que en la naturaleza los elementos de mena que constituyen un depósito mineral se presentan generalmente asociados con otros elementos.

Así entonces se determinaron correlaciones positivas significativas entre los pares **Pb-Al**, **Zn-Co**, **Zn-Cu** con rangos de **(0,6-0,7)** y una correlación moderada para los pares **Zn-Ag**, **Pb-Ba**, **Cu-Be** y **Zn-Ni** dentro del rango **(0,5-0,6)**, estos elementos correlacionables son de tipo metálicos y considerado como elementos calcófilos, de ahí su importancia en la formación de mineralización y su posible concentración en fracturas y fallas dentro de esta zona.

Por otra parte también se observan correlaciones negativas significativas con rangos de **(0.7 - 0.6)** para el par **Zn-As** y **(0,5 - 0,6)** para el par **Cu-As**. Estas correlaciones negativas se consideran también como elementos guía para la exploración por Ag y Au e importantes para su prospección.

Los gráficos de dispersión nos permitieron observar la distribución de las variables en base a los resultados de los sedimentos de arroyo y su ubicación dentro las corrientes hidrográficas, tomando en cuenta la distancia principal en cada uno de los elementos muestreados.

Los datos factoriales obtenidos mediante el ACP, nos muestran asociaciones positivas (K, Be, Al, Ba, Pb) y asociaciones negativas (K, Be, Al, Ba, Pb y Ag, Au, P) considerados como factores de mineralización y son correlacionables con las respuestas de correlación lineal representados y distribuidos en las rocas volcánicas del grupo Pachuca principalmente de la Fm. Vizcaína (TsTA-Da)

La interpolación de las variables fue realizada mediante el método de interpolación IDW de ArcGis, tomando como base los valores altos en concentración de las mismas, para representar gráficamente su distribución mediante isovalores, simbolizando valores altos en color rojo y los bajos en color azul de acuerdo a una escala de colores representativa. Las respuestas de los elementos interpolados se presentan distribuidas en varias áreas de la zona de estudio, el Au, Ag, Zn se presenta en los poblados de Capúla-San José Tepenené,

las variables Au, Pb, Cu, Zn en áreas del poblado Mineral del Chico, los elementos atípicos de Au, Ag, Pb, Cu, Zn en la zona Pachuca-Real del Monte. La presencia de estas anomalías se presenta en rocas volcánicas dacíticas e Ignimbrítas, así como tobas andesíticas de edad terciaria del grupo Pachuca (Figuras III.21 Y III.22).

CAPITULO IV.

ANALISIS Y ADECUACION EN EL SIG

IV.1. Introducción.

La exploración minera moderna se caracteriza por el uso de métodos de reconocimiento y muestreo diversos, basados en el conocimiento geológico y minero de la región en estudio, y en la aplicación de sofisticadas técnicas de prospección geofísica, geoquímica y de teledetección. De esta forma, una vez recopilados los datos necesarios los expertos intentan que el riesgo de fallo pueda ser minimizado, verificando que el número de elementos de información extraídos de los datos exploratorios ha sido maximizado, o lo que es lo mismo, que el proceso de interpretación de los datos ha sido optimizado (Chica-Olmo et al., 2002). Es necesario en consecuencia disponer de métodos efectivos de análisis e integración de datos de exploración minera.

En este sentido, la manipulación, análisis e integración de los datos de exploración utilizados en cartografía predictiva de potencialidad minera se ha visto facilitada por el desarrollo de nuevos métodos de análisis espacial basado en sistemas de información geográfica (SIG) (Bonham-Carter, 1991; Harris *et al.*, 2000).

IV.2. Componentes del SIG en un Sistema de Información Espacial.

Los SIG's poseen los mismos componentes de un sistema de información, tales como datos y base de datos, hardware (procesadores, periféricos), y software (manejadores de base de datos). Las funciones típicas de un SIG son: adquisición de datos administración de datos mediante una base de datos, consulta y recuperación de datos, análisis de datos, modelado de datos, despliegado de datos. Los SIG's poseen identificadores de localidad características que conforman a los ambientes naturales y geográficos.

Como cualquier Sistema de Información, un SIG no se trata sólo de un programa informático sino que debe conjugar otros elementos que hacen posible su funcionamiento. En la (Fig. IV.1), se muestran los componentes de un SIG de una forma interactiva para llegar al final en la toma de decisiones.

IV.3. Método de integración y adecuación de datos espaciales.

Los modelos de integración de datos espaciales mediante SIG son categorizados en distintos grupos en función de la metodología empleada o el objetivo perseguido. En términos generales, un modelo SIG puede ser considerado como el proceso de combinación

de un conjunto de mapas o capas de entrada para producir un mapa de salida (Burrough, 1986; Aronoff, 1989; Berry, 1993), como se muestra en la expresión siguiente:

$$\text{Mapa}_{\text{salida}} = f(\text{Mapa}_1, \text{Mapa}_2, \text{Mapa}_3, \dots, \text{Mapa}_n)$$

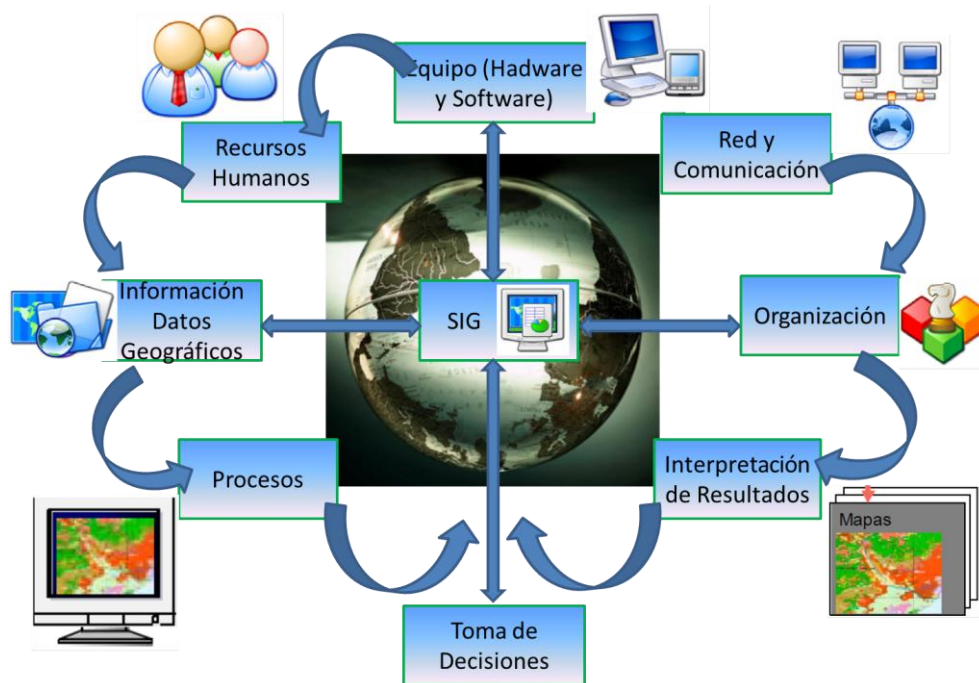


Fig. IV.1 Interacción de las componentes en un SIG, dentro una exploración.

Donde la función f presenta formas diferentes y puede ser categorizada en tres tipos dependiendo de la naturaleza de la relación expresada (Bonham-Carter, 1994): (a) basada en teorías y principios de la física y la química, (b) empírica, basada en observaciones de los datos (estadística o heurística), o (c) algún tipo de mezcla entre teoría y empirismo, lo que da origen a otra clasificación de los modelos en teóricos, empíricos e híbridos, respectivamente.

Las capas clasificadas, o funciones de favorabilidad, son combinadas siguiendo reglas que pueden ser lógicas, aritméticas, probabilísticas, etc., donde las capas o vectores son primordiales en el momento de combinar los datos para la determinación o toma de decisiones en un prospecto minero o de cualquier otra aplicación.

Las funciones de favorabilidad (favorables) son deducibles mediante la aplicación de métodos diversos de análisis espacial, que pueden ir desde una simple reclasificación de las clases temáticas de un mapa hasta métodos estadísticos.

Para realizar este estudio se dispuso de un volumen de datos geológicos, geoquímicos, estructurales, geofísicos, imágenes de satélite, como se muestra en la Tabla IV.1, donde se indican los conjuntos de datos primarios utilizados en la integración de los datos espaciales de estas coberturas, y a partir de éstos se han obtenido un gran número de conjuntos de datos secundarios mediante distintas operaciones de análisis espacial, con la finalidad de facilitar el proceso de integración de datos.

Tabla IV.1. Datos primarios disponibles y sus características.

Nombre	Escala	Proyección	Adquisición	Geometría espacial	Atributos	Tipo de atributo
Geología	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Polígono	Base de datos de Unidades Litológicas	Ordinal *
Geoquímica	1:50,001	UTM	Base de datos digital (SGM)	Puntos	Base de datos Au + 31 elementos	Ordinal *
Estructuras	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Lineal	Base de datos, Tipo, Orientación	Ordinal *
Corriente hidrográficas	1:50,000	UTM	Vectorial (INEGI)	Lineal	Tipo, Dirección	Ordinal *
Minas	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Puntos	Base de Datos, Elementos; Mineralogía, Leyes	Ordinal *
Vetas	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Lineal	Tipo, Orientación, Dirección, Mineralogía	Ordinal *
Datos Estructurales	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Puntos	Tipo, Orientación, Símbolo	Ordinal *
Zonas de Alteración	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Polígono	Tipo, Origen	Ordinal *
Curvas de Nivel	1:50,000	UTM	Vectorial (INEGI)	Lineal	Tipo, Elevación	Ordinal *
Magnetometría Campo Total	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Raster	C. magnético; anomalía CT	Razón; Valor
Imagen Landsat TM	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Raster	Radiancia (7 bandas; píxel 30m)	Razón; Valor
Ratios (Razones) por Oxidos	1:50,000	UTM	Base de datos digital (SGM)	Raster	Imagen Aster (14 bandas píxel 15m, bandas 3/1)	Razón; Valor
* Ordinal: Variables discretas ordenadas (Análisis de Concordancia de atributos,					Federico Picardo Alvarado, 2008	

Para este proyecto el método de integración y adecuación de las capas o layer fue idealizado para su interpretación y consultas espaciales en forma interactiva con información vectorial generada en el SGM, con variables de interés como Geología, Estructuras, Geoquímica, Zonas de Alteración Vetas, Magnetometría, Imágenes Satelitales, Infraestructura y análisis en 3D, usando un sistema de información geográfica con el software ArcGis 9.3, superponiendo y en combinación con otros procesos definir áreas de influencia de interés prospectivo.

En la Fig. IV.2, se ilustra un ejemplo de superposición de las capas en un orden representativo ubicándolas de acuerdo sus características (raster o vectoriales), para un mejor manejo de la información, dentro de un SIG. Esta adecuación nos permitirá aplicar y ubicar los datos obtenidos en el análisis elaborado en combinación con la información geológica minera.

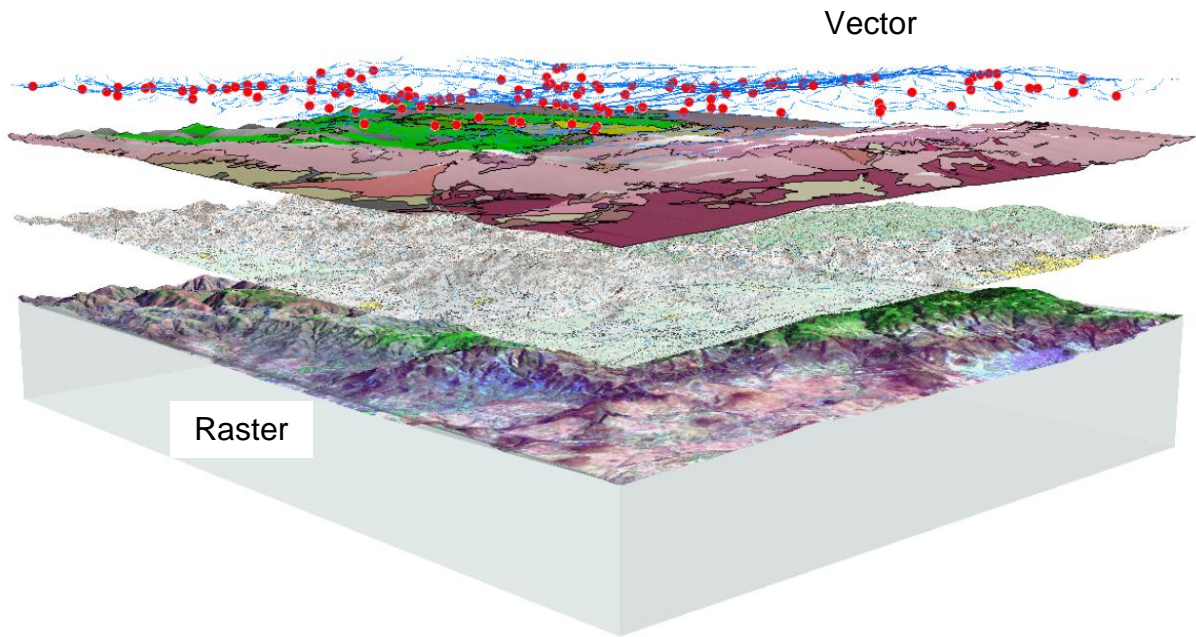


Fig. IV.2. Superposición de las capas de información

La adecuación del proyecto, fue generado con el software ArcGis 9.3, de tal manera que las capas de información estuvieran estructuradas de una forma ordenada e interactiva como se ve en Tabla IV.2, de acuerdo a los temas de su desarrollo por cada capa principal. Se adicionaron varios layers en combinación a su propósito e interés en el desarrollo del proyecto.

Las capas del SIG adecuadas e interactivas en este desarrollo, se diseñaron con el software Visual Basic del propio programa, de tal manera que la interacción y combinación de las capas, el o los usuarios puedan manejar de manera sencilla los layers con su base de datos realizando análisis, consulta y cruce de información, que permita delimitar cualquier zona de interés y tomar decisiones con estos análisis.

Para cada uno de los layers adicionados se tomó en cuenta sus parámetros geográficos para su mejor ubicación dentro del plano espacial, revisando sus formatos, proyección, gráficos y

base de datos que son básicos para la formación de la información generada.

Tabla IV.2. Capas principales del proyecto SIG.

GEOLOGIA			
ZONA ESTUDIO	ESTRUCTURAS		
ANOTACIONES	ZONA ESTUDIO	GEOQUIMICA	
VETAS	ANOTACIONES	ZONA ESTUDIO	ANALISIS ESPACIAL
ESTRUCTURAS	VETAS	ANOTACIONES	ZONA ESTUDIO
ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	HIDROGRAFIA	ANOTACIONES
ZONA URBANA	ZONA URBANA	GEOQUIMICA (Au, Ag, Pb, Cu, Zn)	COMBINACION E INTERSECCION (Au, Ag, Pb, Cu, Zn)
GEOLOGIA	RELIEVE	ZONA URBANA	INTERPRETACION (Au, Ag, Pb, Cu, Zn)
RELIEVE		RELIEVE	RELIEVE

IV.4. Funcionalidad del Sistema de Información Geográfica.

La característica fundamental de un Sistema de Información Geográfica (SIG) lo constituye la Base de Datos, sistema que almacena, gestiona y analiza datos para producir información útil en forma de mapas o de informes.

Tabla IV.3. Base de datos geológico de la zona de estudio en general.

Area	Simbolo	Nombre	Espesor	Definio	Localidad Tipo	Litologia	Terrenos Tecto	Ambiente Deposito	Estructuras Regionales	Relacion Estratigrafica	Codigo Litologico
55,19245	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
128,47387	88		40 A 100 M			BASALTO		SE DEPOSITAN COMO I		YACEN DISCORDANTI	QB
0,4123	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,02457	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
2,06603	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
1,22864	80	FM. TARANGO	50 A 100 M	FRIES, 1962		CONGLOMERAE		RELLENA VALLES Y CUE		DESCANSA EN DISCO	TpCg-Ar
0,23917	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
17,32896	193	FM. CORTEZA	50 A 300 M	GEYNE, 1959		ANDESITA	CINTURON V	DERRAMES ANDESITIC		SOBREYACE A LA FM	TsA
1,49141	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
16,77975	173	FM. EL DOCTOF	500 M	B.W.WILSON Y OT	POBLADO EL I	CALIZA		FACIES C LADRON CAL		SU CONTACTO INFER	KiCz
16,85057	831	FM. EL DOCTOF	500 M	B.W.WILSON Y OT	POBLADO EL I	CALIZA	SIERRA MADIF	FACIES C LADRON CAL		SU CONTACTO INFER	KiCz
2,67603	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,41208	831	FM. EL DOCTOF	500 M	B.W.WILSON Y OT	POBLADO EL I	CALIZA	SIERRA MADIF	FACIES C LADRON CAL		SU CONTACTO INFER	KiCz
0,05131	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
0,35825	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,54941	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
0,31943	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
0,47441	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,4576	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,15	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
95,47113	80	FM. TARANGO	50 A 100 M	FRIES, 1962		CONGLOMERAE		RELLENA VALLES Y CUE		DESCANSA EN DISCO	TpCg-Ar
0,51592	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,34571	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
2,6528	831	FM. EL DOCTOF	500 M	B.W.WILSON Y OT	POBLADO EL I	CALIZA	SIERRA MADIF	FACIES C LADRON CAL		SU CONTACTO INFER	KiCz
1,46824	831	FM. EL DOCTOF	500 M	B.W.WILSON Y OT	POBLADO EL I	CALIZA	SIERRA MADIF	FACIES C LADRON CAL		SU CONTACTO INFER	KiCz
4,61213	80	FM. TARANGO	50 A 100 M	FRIES, 1962		CONGLOMERAE		RELLENA VALLES Y CUE		DESCANSA EN DISCO	TpCg-Ar
1,45259	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,71262	326	FM. SANTA GER	200 A 350 M	GEYNE, 1959	BARRANCA PR	ANDESITA, DAC		DERRAME MASIVO CON		SOBREYACE DISCOR	TsBvA-Da
1,02212	205	GRUPO EL MOF	10 A 40 M	SIMONS Y MAPES,	CERRO EL MO	CONGLOMERAE		CONTINENTAL		SOBREYACE EN DISC	TiCgp
0,78072	202	FM. MENDEZ	10 A 80 M	AGUILERA Y ORDC		LUTITAS ARENC		FLYSCHOIDE, CORRESI		SOBREYACE CONCOI	KsLu-Ar
0,56182	176	FM. VIZCAINA	200 A 400 M	GEYNE, 1959	BARRANCA NC	ANDESITA, DAC		PRODUCTOS VOLCANIC		EN LA BASE PRESENT	TsTA-Da
5,34846	205	GRUPO EL MOF	10 A 40 M	SIMONS Y MAPES,	CERRO EL MO	CONGLOMERAE		CONTINENTAL		SOBREYACE EN DISC	TiCgp
0,4917	88		40 A 100 M			BASALTO		SE DEPOSITAN COMO I		YACEN DISCORDANTI	QB

En este sentido, la base de datos para cada una de las capas se encuentra interrelacionadas y estructuradas con datos alfanuméricos capturados de los informes geológicos mineros de la cartografía esc: 1:50,000, para su consulta y funcionalidad dentro y fuera del SIG, como se muestra en la Tabla 18, en caso para el tema de los datos geológicos.

Las funciones principales que componen el SIG están relacionadas con las coberturas que se utilizaron en la generación del mismo. En la Tabla IV.3 se muestran las características de las capas de información (geología), así como su base de datos correlacionadas espacialmente dentro del proyecto en general que se utilizaron en el transcurso de este desarrollo.

Estos datos son indispensables en la consulta y análisis de información para la interpretación y toma de decisiones en un área de estudio determinada, como se muestra en la (Fig. IV.3).

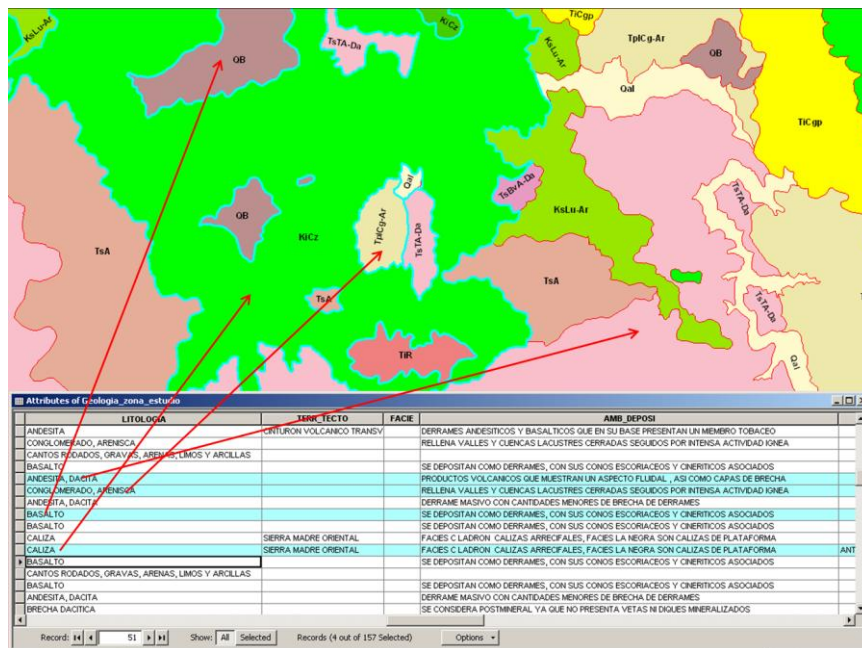


Fig. IV.3. Representación esquemática de los contactos y su tabla de atributos interrelacionados

Para cada uno de los layers adicionados se tomó en cuenta sus parámetros geográficos para su mejor ubicación dentro del plano espacial, revisando sus formatos, proyección, gráficos y base de datos que son básicos para la formación de la información generada, tomando como base esta información de cada uno de las capas se generara una aptitud o rango de influencia para las áreas prospectivas.

IV.5. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) dentro del SIG.

IV.5.1. Metodología, desarrollo del AHP.

Metodología.

El organigrama de la metodología se muestra en Fig. IV.4. Los procedimientos del proceso de esta metodología son los siguientes:

- Determinación de los criterios de exploración para la zona prospectiva.
- Preparación de las capas para los mapas en un ambiente GIS como salida de capas vectoriales o raster.
- Aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para definir las alternativas de los atributos de las capas.
- Utilización del método por comparaciones pareadas para obtener los pesos relativos de las capas.

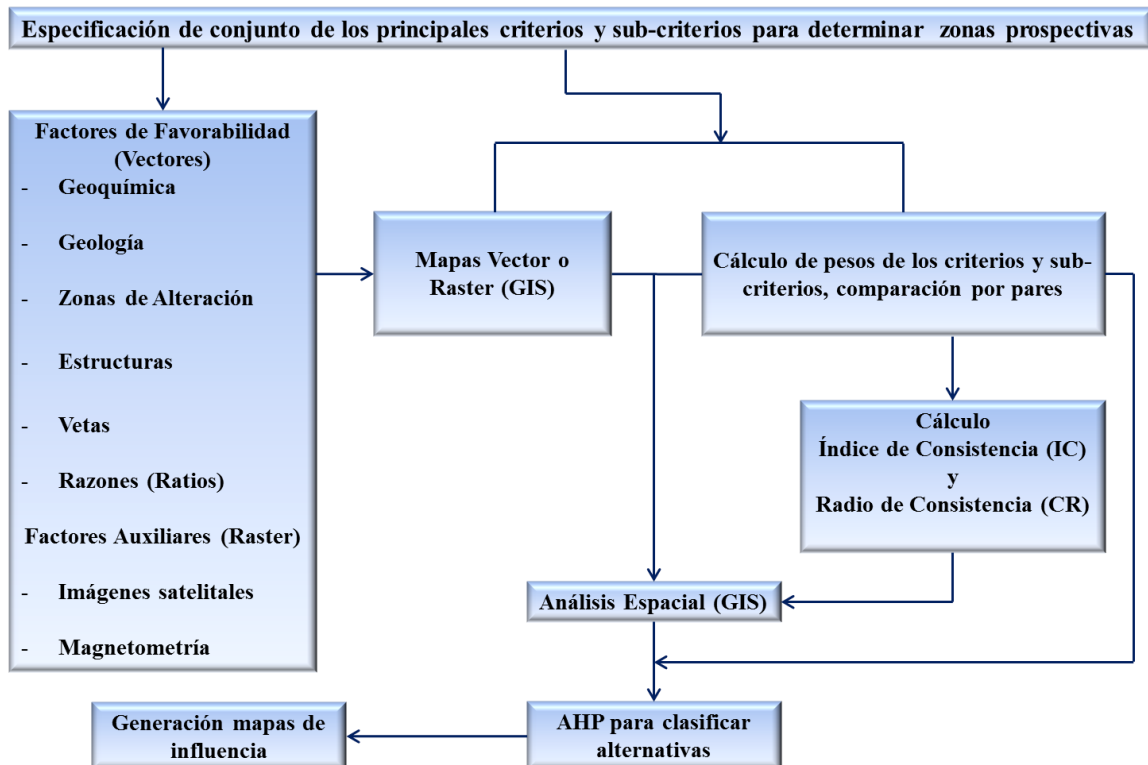


Fig. IV.4. Diagrama de flujo del modelo AHP para el mapeo de áreas prospectivas.

El organigrama mostrado presenta un diagrama de flujo de un modelo AHP para llegar a la predicción de áreas prospectivas, en base a los datos de procesamiento.

Una vez creada la base de datos geoespaciales geológico-minera, cada conjunto de datos sobre geología, geoquímica, estructural, vetas, magnetométrica, imágenes de satélite, etc., se procesaron de forma semi-independiente de acuerdo con los objetivos planteados; es decir, para deducir la información de interés relacionada con las zonas favorables o predictivas de presencia de depósitos minerales (capas predictivas).

Estas clases de capas predictivas SIG fueron posteriormente reclasificadas en función del interés prospectivo que presentan, para generar áreas de favorabilidad, usando el AHP. Los valores resultantes que permiten establecer clases de favorabilidad, se definieron siguiendo distintos procedimientos estadísticos y espaciales.

Para la fase de integración se utilizaron modelos basados en el conocimiento del AHP (por pares ordenados) desarrollados usando el lenguaje interno del software ArcGIS y programas externos de análisis estadístico. La metodología desarrollada en este trabajo se ha orientado a detectar las zonas de interés minero, conocidas o no mediante métodos tradicionales.

La calidad y robustez del SIG de exploración serán parcialmente evaluadas mediante comparación de la realidad minera, expresada en términos de ocurrencias o indicios mineros conocidos y los resultados proporcionados por el sistema.

IV.5.2. Desarrollo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).

Como se mencionó en la presentación de los datos, el AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión basándose en una comparación por pares con la importancia de diferentes criterios y subcriterios (Saaty 1980), para la toma de decisiones en la combinación con un SIG.

EL AHP, presenta métodos de participación pública que permiten identificar y ponderar atributos de decisión en la etapa de caracterización de los estudios técnicos de cualquier índole. En el desarrollo de este análisis se integran algunas características de importancia para mayor claridad, como se mencionan a continuación:

1) Identificación de atributos

Esta fase consiste en identificar los atributos que deban emplearse para establecer las zonas prospectivas de la zona de estudio. El producto de esta etapa es una lista de atributos con su definición y su escala de medición. Para este caso la identificación de los atributos se tomaron en cuenta por su importancia geológico-minera y su grado de aparición en la zona de estudio.

La identificación de los atributos principales fueron: Geoquímica, Geología, Zonas de alteración, Estructuras, Vetas, Razones (Ratios) por Óxidos y Arcilla y como apoyo se utilizaron atributos secundarios de las cuales se usaron imágenes de satélite y magnetometría.

2) Establecimiento de la jerarquía de atributos.

Después de identificar los atributos, se estableció la prioridad de acuerdo al orden de importancia o preferencia, usando los primeros pasos del Proceso Analítico Jerárquico por comparaciones pareadas.

El producto de esta etapa es una lista con los atributos escritos en orden de preferencia, para el caso de la zona de estudio los atributos jerárquicos que se tomarán en consideración se muestra en la Tabla IV.4. Las imágenes y la magnetometría, solo se usaran como herramienta auxiliar en la combinación de los datos a procesar.

Tabla IV.4. Atributos y prioridad de las capas espaciales en la zona de estudio.

Atributo	Prioridad
Geoquímica	1
Geología	2
Zonas de Alteración	3
Estructuras	4
Vetas	5
Razones (Oxidos, Arcillas)	6

3) Ponderación de atributos.

Los problemas multicriterio típicamente involucran atributos de diferente importancia para los grupos de interés. Por lo tanto, es necesario tener información sobre la importancia relativa

de cada atributo. Esto generalmente se logra asignando un peso a cada uno de ellos. El peso es el valor asignado a un atributo de evaluación que indica su importancia relativa con respecto a los otros atributos. En general, mientras mayor sea el peso de un atributo, mayor es su importancia

4) Identificación y ponderación de los atributos.

Existen diferentes procedimientos para ponderar atributos con base en las preferencias de las capas a utilizar. Para este desarrollo, se usará el de comparaciones pareadas dentro del proceso analítico jerárquico, que está caracterizado por los siguientes pasos: a) Definir la jerarquía y b) Realizar comparaciones pareadas de los elementos.

a) Definición de Jerarquías.

Este paso consiste en establecer la jerarquía de los elementos más importantes de la zona de estudio como se muestra en la Tabla 3 mostrada en la descripción de los datos del AHP.

b) Comparaciones pareadas de los elementos.

Las comparaciones pareadas son bases fundamentales de AHP. El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 (Tabla IV.5), para calificar las preferencias relativas de dos elementos. Así se reduce la complejidad de la toma de decisiones ya que sólo se consideran dos componentes a la vez. Para realizar estas comparaciones por pares se tienen que generar los siguientes pasos:

Tabla IV.5. Escala de preferencias para valorar la importancia de los atributos.

Intensidad de importancia	Definición
1	Igual importancia
2	Importancia igual a moderada
3	Importancia moderada
4	Importancia moderada a fuerte
5	Importancia fuerte
6	Importancia fuerte a muy fuerte
7	Importancia muy fuerte
8	Importancia fuerte a extremadamente fuerte
9	Importancia extrema

❖ Generación de la matriz de comparaciones pareadas.

Para elaborar la matriz de comparaciones pareadas, se basó en el rango de valores entre una escala de 1 a 9 (Tabla IV.5), para evaluar la preferencia entre cada par de atributos de acuerdo al orden mostrado en la Tabla IV.4.

Durante el llenado de la matriz, los datos calculados se consideran recíprocos como se muestra en la Tabla IV.6. Esto implica que si el criterio de Geología es de jerarquía fuerte sobre los demás, entonces los rangos de valores para los restantes deben ser calculados de acuerdo a su importancia con el criterio principal.

❖ **Cálculo del peso de los atributos.**

Consecuentemente los pesos de los valores fueron determinados de manera precisa con observaciones y criterios de expertos en cada una de las capas. Para este cálculo fue necesario tener armada la matriz con los valores determinados como se muestra en la Tabla IV.6, y generar los siguientes procesos:

Tabla IV.6. Resultados de la matriz calculada por comparaciones pareadas.

Matriz de comparaciones pareadas (Prospección Minera)					
Criterio	GEOQUIMICA	GEOLOGIA	ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	VETAS
GEOQUIMICA	1	3	4	5	7
GEOLOGIA	1/3	1	3	5	8
ALTERACIONES	1/4	1/3	1	4	7
ESTRUCTURAS	1/5	1/5	1/4	1	4
VETAS	1/7	1/8	1/7	1/4	1

- a) Suma de valores de cada uno de los criterios de la matriz de comparaciones pareadas.
- b) División de cada elemento de la matriz.
- c) Cálculo del promedio de los elementos de la matriz normalizada.

Como resultado de este análisis se produjo el mapa de cada una de las capas con sus respectivos pesos calculados como se muestra en la Tabla IV.7, para su interpretación y

combinación dentro del SIG para conocer las zonas prospectivas de influencia del área de estudio.

Tabla IV.7. Resultados de los pesos calculados para los atributos de las capas.

SUMA DE VALORES						MATRIZ NORMALIZADA					PROMEDIO (PESO)		
Criterio	GEOQUIMICA	GEOLOGIA	ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	VETAS		GEOQUIMICA	GEOLOGIA	ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	VETAS	PROMEDIO (PESO)	CRITERIO
GEOQUIMICA	1	3	4	5	7		0.519	0.622	0.541	0.328	0.259	0.454	GEOQUIMICA
GEOLOGIA	0.33	1	2	5	8		0.173	0.207	0.271	0.328	0.296	0.255	GEOLOGIA
ALTERACIONES	0.25	0.50	1	4	7		0.130	0.104	0.135	0.262	0.259	0.178	ALTERACIONES
ESTRUCTURAS	0.20	0.20	0.25	1	4		0.104	0.041	0.034	0.066	0.148	0.079	ESTRUCTURAS
VETAS	0.14	0.13	0.14	0.25	1		0.074	0.026	0.019	0.016	0.037	0.035	VETAS
SUMA	1.93	4.83	7.39	15.25	27.00		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	SUMA

❖ **Estimación de la consistencia.**

El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis, (Chacón et al., 2006). Para comprobar si las comparaciones son consistentes, se debe determinar el vector de la suma ponderada y el vector de consistencia (Tabla IV.8).

Tabla IV.8. Suma ponderada y vector de consistencia de los atributos.

VECTOR DE LA SUMA PONDERADA					
Criterio	GEOQUIMICA	GEOLOGIA	ALTERACIONES	ESTRUCTURAS	VETAS
GEOQUIMICA	0.454	0.765	0.712	0.393	0.242
GEOLOGIA	0.151	0.255	0.356	0.393	0.277
ALTERACIONES	0.113	0.128	0.178	0.314	0.242
ESTRUCTURAS	0.091	0.051	0.045	0.079	0.138
VETAS	0.065	0.032	0.025	0.020	0.035

SUMA PONDERADA	VECTOR DE CONSISTENCIA		
2.566	2.566	0.454	5.654
1.432	1.432	0.255	5.615
0.975	0.975	0.178	5.477
0.403	0.403	0.079	5.131
0.176	0.176	0.035	5.102

Esta medida puede ser normalizada como sigue:

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

Donde IC es el índice de consistencia, Lambda (λ) es el promedio del vector de consistencia y “n” es el número de atributos considerados en la matriz.

Consecutivamente se calcula la razón de consistencia (RC) (o CR, de Consistency Ratio). Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.1 son señal de juicios inconsistentes; y para estos casos es probable que el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas.

Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.1 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas y esta dada por la siguiente expresión para conocer dicha consistencia.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde IC es el índice de consistencia e IA es el índice de inconsistencia aleatoria de los factores o criterios que se usaron y son basados conforme a los datos de la Tabla IV.9.

Tabla IV.9. Índice de Inconsistencia aleatoria para el número de elementos a ponderar.

No. Elementos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indices de Inconsistencia aleatoria	0.00	0.00	0.60	0.90	1.10	1.20	1.30	1.41	1.50	1.50

Así entonces la razón de consistencia esta dada por las siguientes características:

RC \leq 0.1: Consistencia razonable

RC > 0.1: Inconsistencia

Por lo tanto en la Tabla IV.10 se muestra la consistencia razonable para la zona de estudio en la cual cumple con los requisitos mencionados anteriormente (SEMARNAT, 2006).

Tabla IV.10. Índice de consistencia de la zona de estudio en general.

$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1}$	=	$\frac{0.396}{4}$	=	0.099
$RC = \frac{IC}{IA}$	=	$\frac{0.099}{1.12}$	=	0.088

Para todos los modelos elaborados, se calculó la Razón de Consistencia (*CR del inglés Consistency Ratio*) descartándose de manera automática aquellos con un CR mayor de 0.1.

Se definieron los valores de los pesos para los factores espaciales usando el método de AHP y usando el procedimiento de suma ponderada se aplicaron los pesos adquiridos para calcular los mapas de salida y determinar las áreas probables o continuación de exploración minera.

IV.5.3. Generación de procesos del AHP con el SIG.

Una vez establecido el conjunto de atributos, cada uno de ellos se representó en un mapa con una base de datos en un sistema de información Geográfica (SIG), en combinación con los pesos de los atributos para generar un mapa raster con valores numéricos graficados con el software ArcGis.

El proceso para generar los mapas se basa en funciones de SIG que incluyen la entrada, almacenamiento, manipulación, análisis y elaboración de reportes de datos geográficos. Estos se generaron a partir de bases de datos que incluyen distribución geográfica de los diferentes valores que adopta el atributo.

Los datos de entrada y los resultados del proceso, se describirán de acuerdo al orden en que fueron determinados los pesos de los atributos como se observa en el cuadro IV.1 Para obtener el peso de cada uno de ellos fue necesario clasificar cada atributo con sus criterios correspondientes dándoles un valor en orden jerárquico y determinar su importancia para ser procesados mediante el proceso analítico, que se muestran en el (Cuadro IV.1).

Atributo	Definición	Escala de Medición	Valor	Peso
Geoquímica	Au (Oro)	ppb	1	0.444
	Ag (Plata)	ppm	2	0.270
	Pb (Plomo)	ppm	3	0.166
	Cu (Cobre)	ppm	4	0.085
	Zn (Zinc)	ppm	5	0.035
Geología	Porfido Riolitico	Proporcion	1	0.482
	Brechas Volcanicas, Dacitas, Tobas Andesiticas, Andesita	Proporcion	2	0.308
	Caliza, Lutita-Arenisca	Proporcion	3	0.17
Zonas de Alteración	Argilica	Proporcion	1	0.502
	Propilitica	Proporcion	2	0.336
	Oxidacion Argilización	Proporcion	3	0.162
Estructuras	Falla Normal, Falla Inversa	Buffer	1	0.546
	Fracturas	Buffer	2	0.251
	Sinclinal	Buffer	3	0.141
	Anticlinal	Buffer	4	0.062
Vetas	Long 6240-3200	Buffer	1	0.473
	Long 2900-1000	Buffer	2	0.194
	Long 850-500	Buffer	3	0.178
	Long 490-50	Buffer	4	0.164

Cuadro IV.1. Pesos y valores de las capas utilizadas en la zona de estudio.

Una vez obtenido los datos generados, se procedió a realizar los mapas con los pesos determinados, usando el método del Analysis Spatial (ArcGis 9.3), para convertir los datos numéricos a una imagen raster y obtener como resultado áreas de influencia para cada uno de ellos Como se muestran a continuación:

Geología. En la Fig. IV.5, se observa el mapa geológico generado a partir de los pesos obtenidos, donde se observan resultados de acuerdo a su importancia litológica, determinando cuatro categorías:

Rocas intrusivas (Pórfidos Riolíticos), Rocas Volcánicas, Rocas Calcáreas y Rocas Cuaternarias.

Zonas de alteración. Determinados los pesos por la metodología descrita anteriormente se dio importancia al tipo de alteración hidrotermal que se presenta en la zona, definiendo su valor jerárquico y su peso correspondiente, generando el plano en formato raster Fig. IV.6, definiendo un rango de influencia de acuerdo a las características mineralógicas de cada uno de estas alteraciones, que servirán para la combinación con los demás factores.

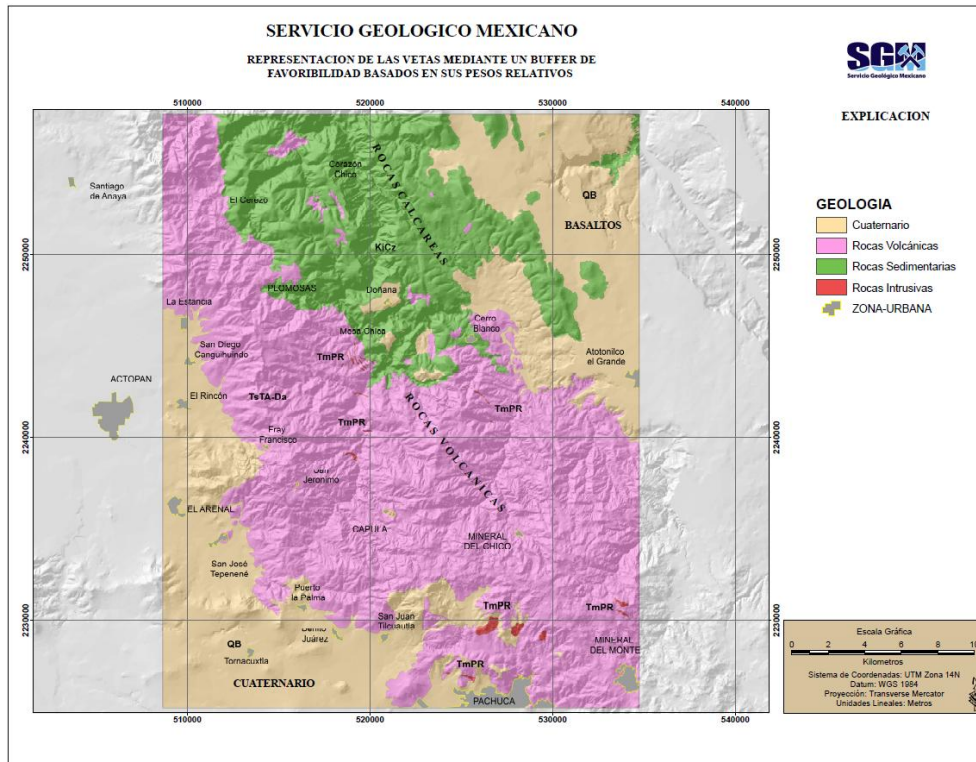


Fig. IV.5. Mapa geológico elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio

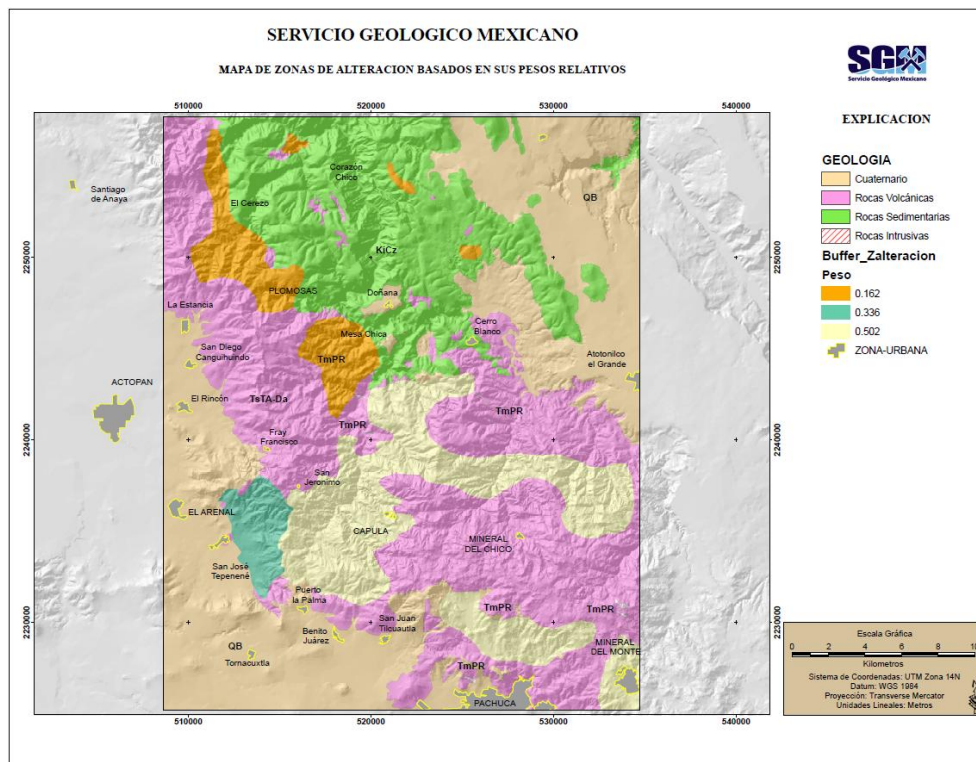


Fig. IV.6. Mapa de alteraciones elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio.

Estructuras. Para el caso de este factor, los criterios usados para determinar su importancia fueron basados por el tipo de estructura presente en la zona y por su relación minera (Favorables y no Favorables), por lo que el valor jerárquico fue calculado en base a las características descritas en el cuadro IV.1.

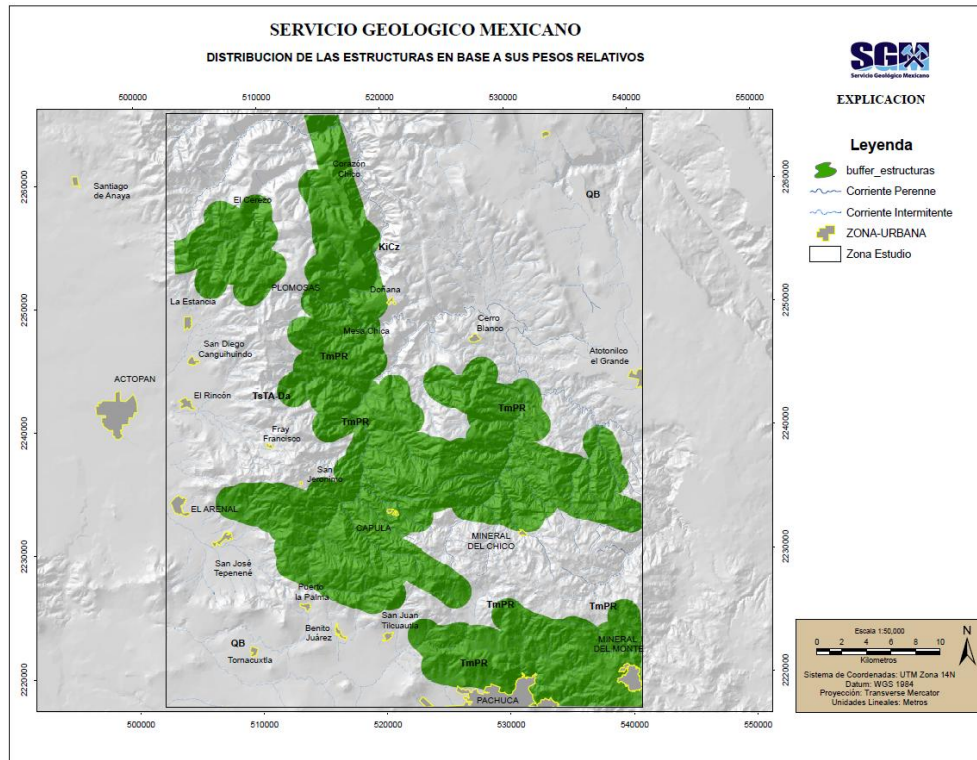


Fig. IV.7. Mapa de estructuras elaborado a partir de los pesos de importancia en la zona de estudio.

El proceso analítico fue realizado por comparaciones pareadas obteniendo sus pesos relativos para su combinación. El resultado de este proceso, fue un archivo en formato vector con rangos asignados por el peso de cada una de las estructuras. Con estos datos se generó un buffer por una distancia (800 m) de acuerdo a su relación minera (Favorables y no favorables) para determinar el rango de influencia de las principales estructuras Fig. IV.7.

Vetas. El procedimiento para determinar los pesos fue similar a los demás factores, usando como parámetro la longitud de las vetas principales con sus espesores correspondientes, de acuerdo al cuadro No. 1.

Una vez calculado sus pesos, se procedió a generar el mapa vector a partir de estos datos dentro del SIG, usando la herramienta Spatial Analysis del ArcGis, generando un buffer a partir de las distancias determinadas que nos permitiera ver un radio de influencia de las

variables expuestas para su combinación con los demás layers. Fig. IV.8.

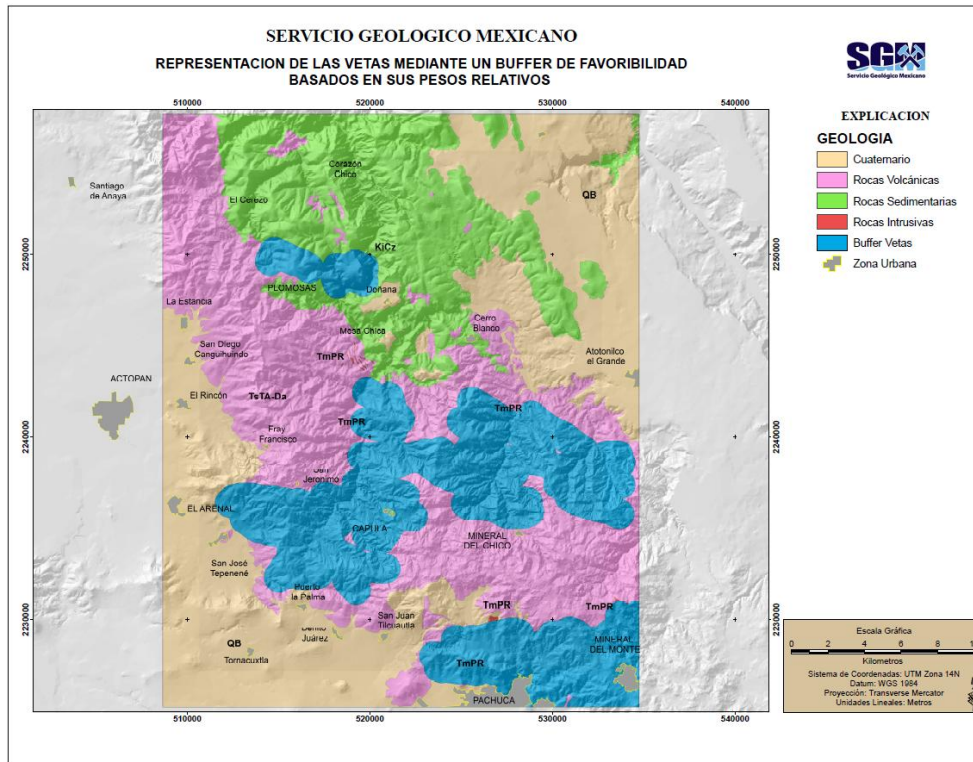


Fig. IV.8. Mapa de vetas elaborado a partir de los pesos los pesos relativos de importancia en la zona de estudio.

Geoquímica. Para el análisis de esta variable fue necesario unir las dos áreas en una sola zona para realizar el cálculo de sus pesos relativos, mediante comparaciones pareadas del analisis jerarquico, con el objetivo de visualizar y combinar el comportamiento de las demas variables calculadas y a la vez correlacionar estos datos con lo elaborado dentro del proceso estadistico. La clasificación de las variables (Au, Ag, Pb, Cu y Zn) fueron determinados en rangos de 4 valores como se muestra en el cuadro IV.1.

En la Tabla IV.11 se muestran los resultados de los pesos relativos calculados para cada uno de las variables de la parte geoquímica, con el cual fueron graficados e interpolado mediante el método IDW y posteriormente ser combinado con el peso de las capas anteriores para obtener la distribución espacial de cada uno de estos datos atípicos.

Los resultados obtenidos a partir de los pesos, nos permiten visualizar la distribución de las respuestas anómalas de cada una de ellas y ver su comparación con los datos analizados mediante el proceso estadístico y la correlación entre ellos.

Tabla IV. 11. Pesos promedios por variable en la zona de estudio.

Oro (Au)		Plata (Ag)		Plomo (Pb)	
PROMEDIO (PESO)	CRITERIO	PROMEDIO (PESO)	CRITERIO	PROMEDIO (PESO)	CRITERIO
0,476	Au 96-66 ppm	0,465	Ag 10.6-8.26 ppm	0,616	Pb 577 ppm
0,336	Au 47-27 ppm	0,340	Ag 5.3-1.8 ppm	0,214	Pb 96-39 ppm
0,141	Au 26-13 ppm	0,144	Ag 1.7-0.8 ppm	0,121	Pb 37-18 ppm
0,047	Au 9-1 ppm	0,051	Ag 0.7-0.4 ppm	0,049	Pb 17-6 ppm
1,000	SUMA	1,000	SUMA	1,000	SUMA
Cobre (Cu)		Zinc (Zn)			
PROMEDIO (PESO)	CRITERIO	PROMEDIO (PESO)	CRITERIO		
0,447	Cu 24-26 ppm	0,482	Zn 117-75 ppm		
0,355	Cu 21-16 ppm	0,301	Zn 72-53 ppm		
0,146	Cu 15-10 ppm	0,160	Zn 52-38 ppm		
0,053	Cu 9-6 ppm	0,057	Zn 37-19 ppm		
1,000	SUMA	1,000	SUMA		

Por lo consiguiente, como conclusión podemos decir que de acuerdo a la correlación mostrada en el proceso estadístico y el método analítico, las respuestas anómalas mostradas en cada una de ellas presentan distribuciones de áreas similares con algunas áreas de interés.

Ahora queda mostrar estas anomalías en combinación con las demás capas para visualizar las posibles zonas anómalas de la zona de estudio mediante la intersección entre las variables calculadas y observar sus resultados para cada una de ellas.

Por lo tanto se puede deducir que el método estadístico en relación con el proceso analítico proporciona resultados confiables para determinar posibles anomalías prospectivas.

Posteriormente en las discusiones y resultados se mostrará el resultado de la intersección de las capas para mostrar las zonas anómalas.

CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

V.1. Introducción.

Uno de los objetivos de este desarrollo fue definir áreas de interés prospectivas mediante un análisis espacial geológico minero utilizando la información generada y almacenada en un banco de datos (GEOINFOMEX) del SGM a través de su recopilación del proyecto cartográfico escala 1:50,000. Se tomaron datos geoquímicos de sedimento de arroyo, así como datos geológicos mineros respectivamente con su base de datos relacionados para su análisis e interpretación.

V.2. Interpretación y distribución espacial del Análisis Estadístico de la geoquímica.

El estudio de la geoquímica para la interpretación de los datos, se realizó un estudio exploratorio de variables seleccionadas Au, Ag, Pb, Cu, Zn, para determinar la ubicación o distribución espacial de estos.

Mediante la estadística básica, histogramas, correlación lineal, gráficos de dispersión, análisis factorial e interpolación de estas variables se interpretaron áreas con posibles zonas anómalas para realizar estudios de prospección minera a nivel local.

Distribución Espacial.

Para la zona Actopan, los resultados del análisis estadístico muestran zonas de interés con características atípicas como el área de Plomosas donde se manifiestan anomalías de contraste positivas para Pb, Ag, Cu, Zn y en el poblado Doñana donde ocurren anomalías de contraste positivas para Au, Pb, Zn.

La distribución de estas anomalías de contraste sigue un patrón con rumbo NW-SE, asociado a zonas de falla a orientación casi paralela a las estructuras de la zona. Especialmente estas muestras son de rocas calcáreas de la Fm. Doctor (KICz), en contacto con rocas volcánicas de la Fm. Vizcaína (TsTA-DA), como se mostró en la Fig. III.11. La mineralización presente en esta zona es de origen hidrotermal formado por relleno de fisuras y fallas, donde se observan cuerpos mineralizados en forma de vetas con valores de Pb, Zn y valores significativos de Ag y Au, concordante con la existencia de las anomalías de contraste detectada.

Los análisis estadísticos realizados junto con las interpolaciones, muestran correlaciones similares donde se evidencian asociaciones de elementos según variables analizadas, las áreas destacadas, causado a las características geológicas estructurales, muestran áreas interesantes para el potencial desarrollo de prospectos de interés minero.

De igual manera el análisis estadístico para la zona Pachuca, fue similar al de zona anterior, con la determinación de zonas con características favorables para exploración. Los desarrollos de anomalías de contraste positivas se encuentran en las áreas Santa Rosa, Capúla, Mineral del Chico así como la parte norte de Pachuca, estos por Au, Ag, Cu y la parte N-NW del poblado Real del Monte por Ag, Au, Zn. Las anomalías de contraste en estas áreas se encuentran en rocas volcánicas, principalmente de la Fm. Vizcaína (TsTA-DA), en contacto con rocas volcánicas más recientes de la Fm. Zumate (TsBv-Da-Ig).

V.3. Interpretación del proceso de análisis jerárquico (AHP) con el SIG.

Los procesos efectuados por el método analítico jerárquico (AHP), combinados con el uso de sistemas de información geográfica (SIG) facilitan datos para un adecuado análisis espacial con los pesos obtenidos de cada nivel jerárquico en el estudio y evaluación de una prospección minera aplicada para la zona de estudio en común, con resultados determinados por los pesos relativos de las capas utilizadas.

Los resultados obtenidos fueron apoyados a partir de criterios o atributos determinados por una base de datos relacionales y almacenados en un banco digital del (SGM). Las capas o layers utilizados para este desarrollo fueron los siguientes, de acuerdo a un orden jerárquico, como sigue:

1. Geoquímica
2. Geología
3. Estructuras
4. Zonas de Alteración
5. Vetas
6. Razones por óxidos y arcillas
7. Magnetometría (Utilizada como apoyo en la delimitación de estructuras regionales y locales a partir de una imagen magnetométrica regional y residual)
8. Imagen de Satélite (Se utilizó como apoyo para verificar y corroborar los contactos litológicos-estructurales de la zona de estudio.)

Cada uno de estos criterios fue calculado con ayuda del proceso analítico (AHP), y procesado dentro del SIG, para obtener las áreas prospectivas.

Para llegar a estos resultados, primeramente las capas o layers fueron unificados en una sola geometría como áreas (polígonos), por lo que las estructuras y vetas fueron convertidos en polígonos mediante un buffer a partir de su geometría lineal, tomando como parámetro su favorabilidad mineralógica y un radio de influencia de 800 metros.

Una vez unificado estos variables se realizaron dos criterios en cuanto a su orden jerárquico para visualizar y comparar sus resultados de la siguiente manera:

Primer Orden Jerárquico: Geología, Zonas de Alteración, Estructuras, Vetas

Realizado el análisis estadístico de la geoquímica se procedió a utilizar, se efectuó la intersección y combinación de estas con otras capas de información, realizando una ponderación de cada una de estas para obtener zonas de influencia de potenciales áreas anómalas de la zona (Fig. V.1).

Estos resultados se combinaron con el peso de los datos geoquímicos calculados analíticamente por cada una de las variables (Au, Ag, Pb, Cu y Zn), obteniendo áreas de favorabilidad prospectiva, las cuales fueron delimitadas de la siguiente manera: Area I (Pachuca-Real del Monte); Area II (San Jose-Capula y Mineral del Chico), y Area III (Plomosas-Benito Juárez). Para cada una de estas se muestran respuestas mineralógicas en base a sus diferentes características geológica-mineras.

Area I Pachuca-Real del Monte.

Relaciones Geológicas. La geología de la zona procesada y sus pesos calculados dieron como resultado un criterio de búsqueda litológico. En orden de importancia las rocas volcánicas del grupo Pachuca son las de primer orden, incluyendo la Fm. Vizcaína (ToTA-Da), representadas por rocas andesíticas y dacíticas con alteraciones en grado variable como son: clorita, calcita y caolín con cantidades menores de sericita, óxidos de fierro y epidota además de rocas más jóvenes como la Fm. Zumate (TsBvDa-Ig) que sobreyace a la Fm. Vizcaína.

Las rocas intrusivas más importantes están representadas por pórfidos cuarcíferos de grano fino que comprende el tipo más voluminoso de roca intrusiva en esta zona, presentándose

en forma de numerosos diques con potencias de aproximadamente 2 km, que atraviesan la zona de este-oeste a NW.

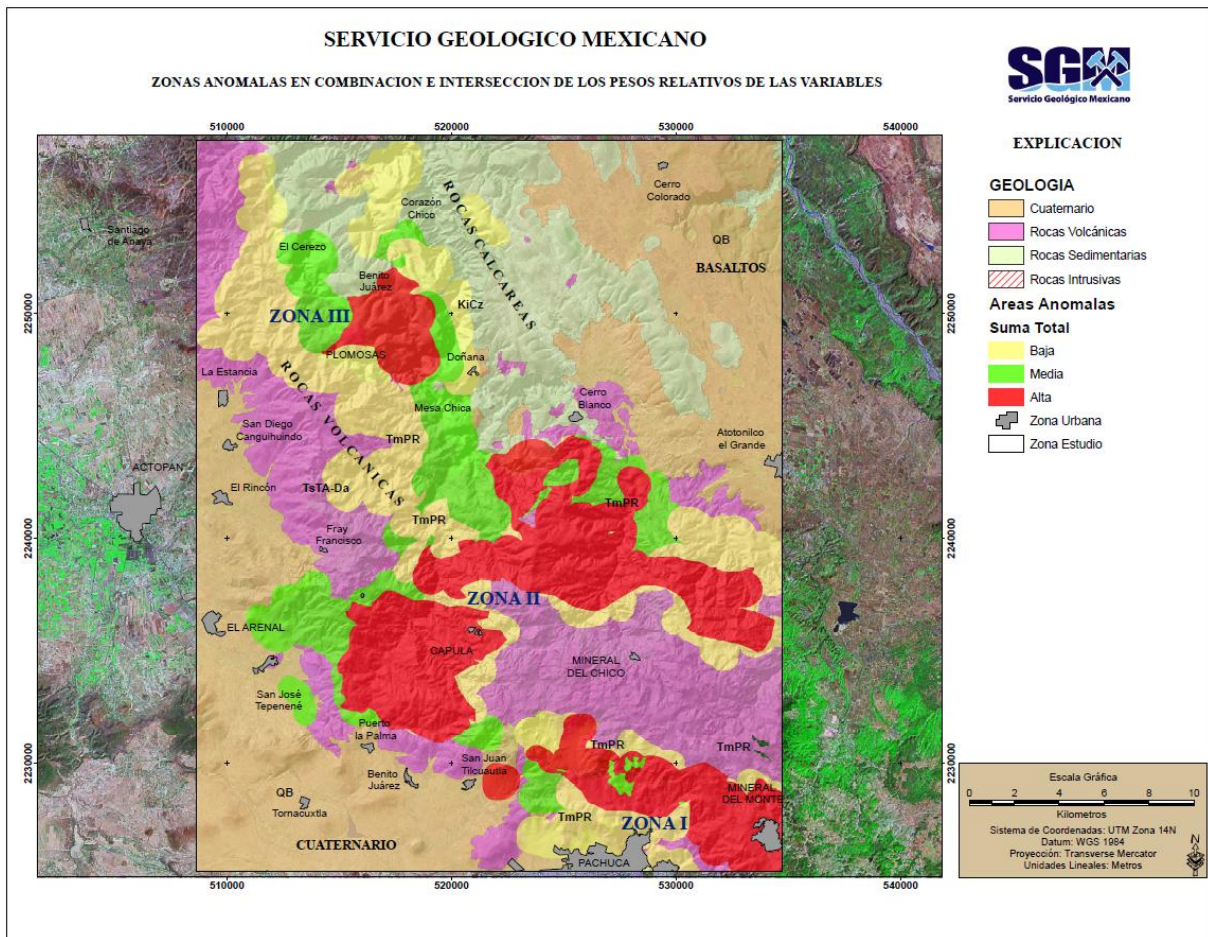


Fig. V.1. Zonas anómalas interpretadas de acuerdo a la intersección de los pesos relativos de los niveles de información de la zona de estudio.

Relación estructural. Las características estructurales que se presentan en esta zona destacan un sistema de orientación E-W con estructuras principales como la veta-falla llamada Vizcaína Oriente y Vizcaína Occidente con un rumbo NW-SE, así como otras estructuras que son huéspedes a la mineralización.

Como segundo sistema se encuentra un fracturamiento norte-sur que surge de un sistema de fracturamiento principal posterior al primer sistema estructural este-oeste. Estas estructuras de carácter frágil suministraron permeabilidad suficiente para el depósito de minerales, como es el caso de las vetas del sistema norte-sur, que en su momento fue uno de los productores a nivel nacional de Ag, Au, (Ramos et al, 1982). Estas estructuras son importantes por su relación con la mineralización.

Los factores determinantes para ubicar áreas de influencia prospectiva mediante las estructuras, se caracteriza por sus atributos específicos como: tipo, origen, orientación y su relación minera. Cada uno de estos atributos se puede emplear para realizar una búsqueda de influencia mediante el SIG, y determinar la favorabilidad en conjunto de cada uno de ellos y para este caso se utilizaron los criterios tipo y relación minera procesados mediante el método analítico en combinación con los demás capas para determinar el área específica.

Existen estructuras más al norte de Pachuca con la misma dirección que las principales y tal vez pudieran ser la continuación de áreas mineralizadas a profundidad somera. No se observan en superficie evidencias mineralógicas ya que estas estructuras están cubiertas por una secuencia volcánica más reciente (**Fm. Zumate TmBvDa-Ig**), que sobreyace a la Fm. Vizcaína (**ToTA-Da**), que es la roca huésped de la mineralización. Otro de los factores por el cual no se ha realizado algún estudio de reconocimiento geológico-minero, es por que la zona se encuentra delimitada dentro de un área natural protegida.

Relaciones Mineralógicas. Se encuentran formadas por soluciones hidrotermales de relleno de fisuras, principalmente a los fragmentos aprisionados o incluidos en las fisuras por el movimiento de los respaldos, con sulfuros argentíferos con plata y oro, que forman los rellenos principales de las vetas.

Esta mineralización se encuentra emplazada en rocas de la Fm. Vizcaína que son la roca caja de estas. Algunos autores como (Brizuela, *et. al.*, 1973), deducen que las vetas conocidas tengan continuación o existan nuevas vetas pertenecientes al sistema de fracturas dominantes y continuen a mayor profundidad y metodos geofisicos nos permitan comprobar su existencia.

Area II San José-Capúla y Mineral del Chico.

Relaciones Geológicas. El análisis litológico indica como resultado que las rocas volcánicas de esta zona son las rocas huéspedes favorables. Las rocas predominantes dentro de esta zona son volcánicas de edad Terciaria, cuya composición varía desde riolita con predominancia de andesita y dacita. Esta sucesión volcánica se encuentra englobada en lo que se conoce como Grupo Pachuca de edad Oligoceno-Plioceno Tardío.

Relación estructural. Estructuralmente el área donde se presentan estas anomalías geoquímicas exhibe un sistema de fracturamiento orientado este-oeste, en el cual se

encuentran alojadas vetas que a la vez son desplazadas tanto vertical como horizontalmente por otros dos sistemas, uno de ellos de rumbo noroeste-sureste y el otro de menor presencia de rumbo norte-sur.

Las rocas terciarias de esta zona fueron deformadas por movimientos de basculamiento de intensidad variable, donde se desarrollaron numerosas fallas con buzamientos muy inclinados de tipo normal con rumbos que varían desde NW al SE y como consecuencia de estos movimientos se originaron fisuras que fueron ocupadas por diques. Posteriormente por acentuación de la subsidencia de las rocas volcánicas debida probablemente a la contracción de las rocas sub-volcánicas se formaron las fallas y fisuras en las que se emplazaron las vetas por la acción del hidrotermalismo de la última etapa de diferenciación magmática.

Las estructuras principales representativas en esa área son: el dique Arévalo-Capúla que atraviesa esta zona por más de 20 kms., con una anchura de más o menos 10 metros y la falla La Trinidad con rumbos E-W, consideradas como vetas por encontrarse mineralizadas. Para generar sus pesos relativos se tomo en cuenta su longitud y relación mineralógica para ser procesados dentro del SIG.

Relaciones Mineralógicas.

La mineralización presente en esta zona se encuentra entre rocas de las Formación Pachuca (Principalmente la Fm. Vizcaína TsTA-Da), presentando alteraciones de tipo hidrotermal. Estas alteraciones procesadas junto con las vetas son de tipo propilitica que se presentan en la zona San José Tepenené y de tipo argílica en la zona Capúla-Mineral del Chico. Las vetas encontradas en esta zona se encuentran encajonados en andesitas de la Fm. Vizcaína (TsTA-Da), con mineralización de Au y Ag principalmente, e indicios de cobre.

Las zonas de mineralización corresponden a fallas y fisuras con rumbos que oscilan entre los 70°-80° NW-SE con buzamientos hacia el sur, con potencias que van desde 0,1 m, a 1 m y corridas que pueden alcanzar hasta 3 km de longitud. La mineralización la constituyen sulfuros (argentita, esfalerita, galena, calcopirita) y óxidos, con estos últimos asociado el oro. Toda esta mineralización viene acompañada de diferentes tipos de alteración como la silicificación, argilitización y propilitización, que se encuentran ligada directamente a la mineralización.

Con el resultado de los pesos relativos por combinación de las estructuras, geología y vetas, se realizó la intersección entre ellas para delimitar las áreas de influencia como se muestra en la Fig. V.1.

Area III Plomosas-Benito Juarez.

Relaciones Geológicas. El área Plomosas-Benito Juárez aloja rocas de origen volcánicas y rocas intrusivas así como una gran cubierta de rocas sedimentarias (calizas, areniscas, lutitas), que varían en edad desde el Cretácico Inferior hasta Terciario (Plioceno). Las rocas terciarias son de composición riolítica y andesítica, que cubren discordantemente a las rocas cretácicas en la parte S y SW del área de Actopan. Las rocas intrusivas de edad Terciario Tardío (Plioceno), se distribuyen en la parte sur, centro-poniente, poniente y norponiente, consistentes en diques que en superficie varían en longitud desde 200 metros hasta 2 km con potencias de 1 a 6 m (Huitron, *et. al.*, 1979).

Relación estructural. La estructura principal que se observa en esta área es el eje de un sinclinal recumbente de rumbo NW-SE con un buzamiento hacia el W, que se encuentra asociado con algunos anticlinales, que forman parte del anticlinorio de la Sierra Madre Oriental (Ramos, *et. al.*, 1982). Hacia la parte este del área Plomosas se infiere el eje del anticlinorio Cerro Blanco, así como fallas normales y un fracturamiento intenso que forman un sistema rectangular.

Relaciones Mineralógicas. La mineralogía de esta zona está principalmente asociada a las calizas, ocupando cavidades de disolución (Paleokarts) de forma y dimensiones muy irregulares, donde han ocurrido procesos de mineralización de este tipo (Vazquez, *et. al.*, 1982), así como alteración y mineralización por fluidos hidrotermales asociados quizás a la actividad magmática que originó los depósitos de las rocas que constituyen el grupo Pachuca. La mineralización que se ha encontrado en el área consiste de Sulfuros, Óxidos y Carbonatos.

La determinación de estas zonas fue apoyado con los resultados de los pesos relativos **geoquímicos** para determinar la distribución espacial de cada una de las variables. Estos datos fueron combinados e intersectados con los resultados de los pesos de las capas de geología, zonas de alteración, estructuras, vetas, dando como resultados las siguientes áreas de influencia delimitadas como se se muestran en las Figuras V.2, V.3, V.4, V.5, V.6.

Como se puede observar cada una de las variables se observan en diferentes areas especificas en cada una de las zonas delimitadas.

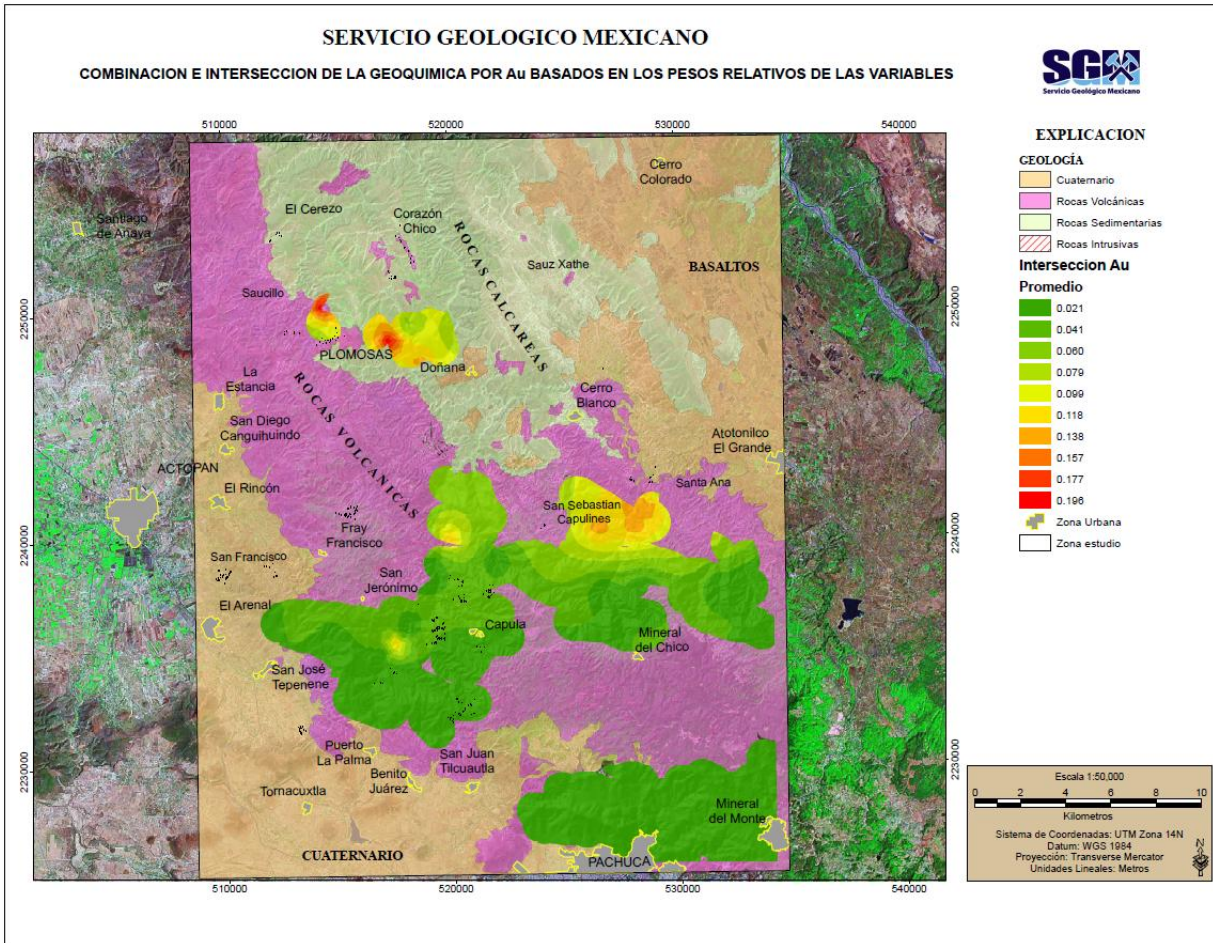


Fig. V.2. Zonas anómalas en combinación con el Au y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.

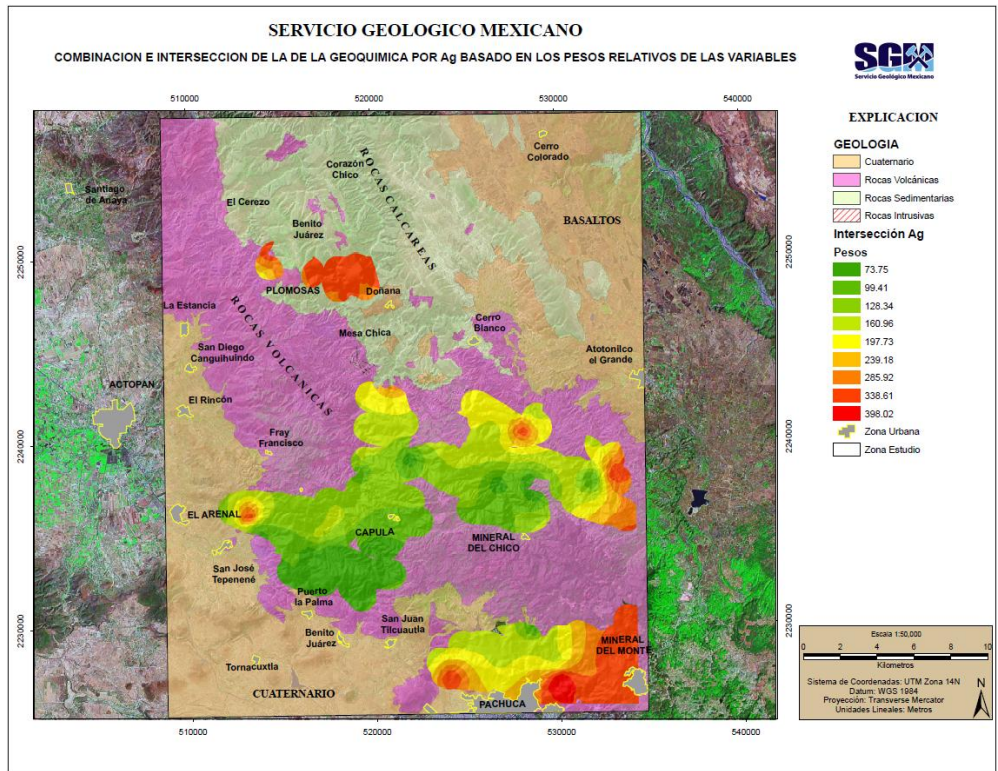


Fig. V.3. Zonas anómalas en combinación con Ag y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.

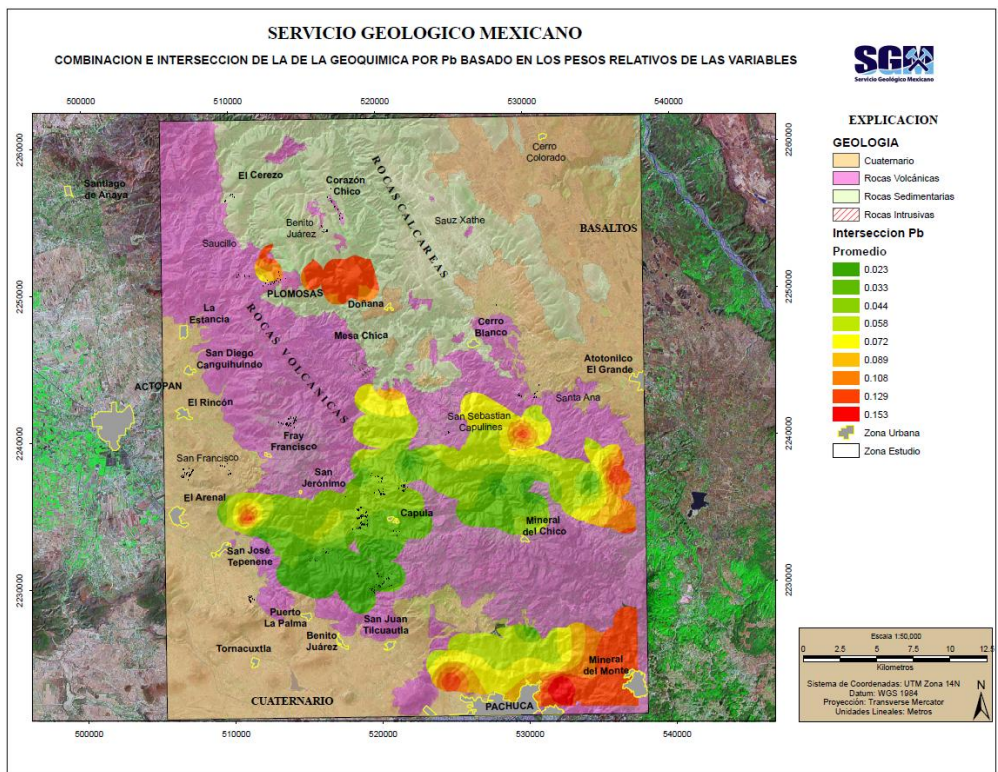


Fig. V.4. Zonas anómalas en combinación con el Pb y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.

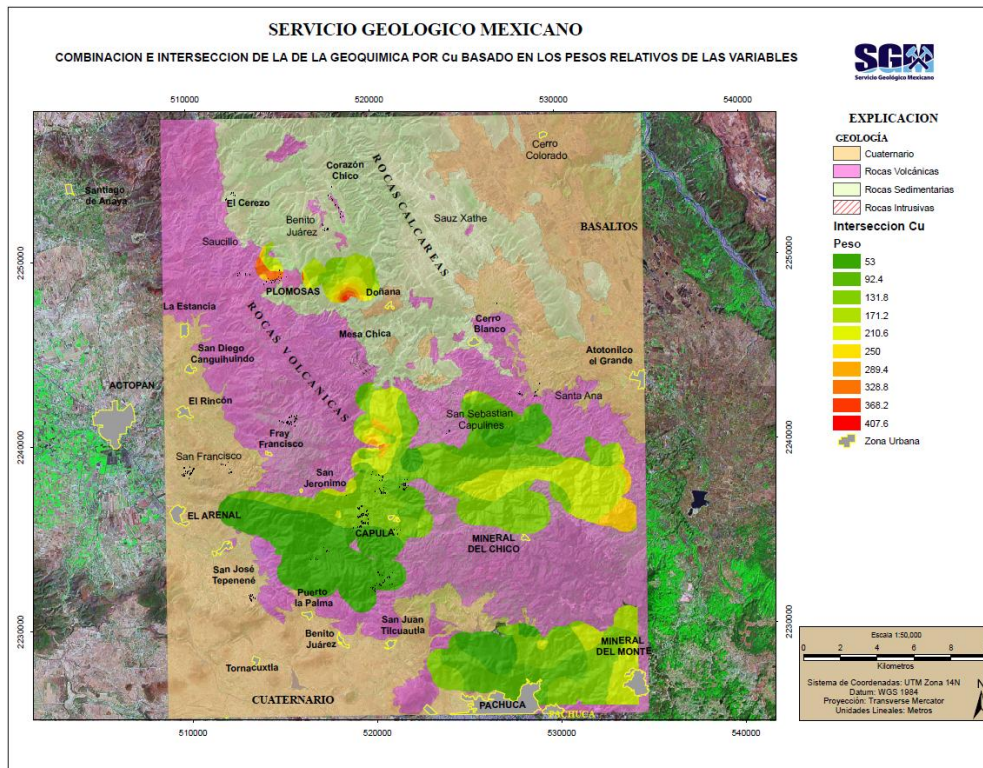


Fig. V.5. Zonas anómalas en combinación con el Cu y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.

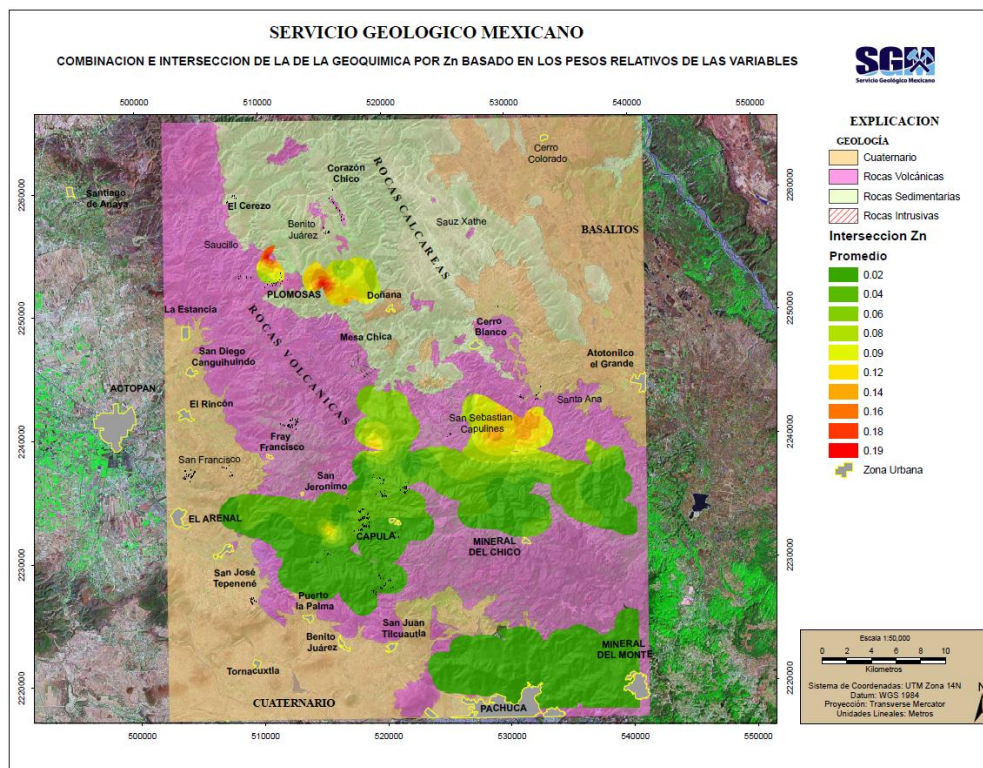


Fig. V.6. Zonas anómalas en combinación con el Zn y los pesos relativos de Geología, Zonas de Alteración, Estructuras y Vetas.

Como se puede observar, los datos procesados mediante esta metodología dan como resultado áreas priorizadas que pueden ser exploradas con mayor detalle, recabando información de campo más actual para obtener resultados más confiables. Pero a la vez se pudo observar que con datos existentes y almacenados en una base de datos, se pueden determinar áreas potencialmente prospectivas para contener mineralización.

Segundo Orden Jerárquico: Vetas, Estructuras, Zonas de alteración, Razones por oxidos y arcillas, Geología

Para visualizar si existe una variación en la distribución de las zonas prioritarias obtenidas anteriormente, se realizó un cambio en el orden de las variables.

La variable por razones se incluyo como un complemento para dar mayor peso a los rangos de influencia de las zonas determinadas con el proposito de observar la distribución espacial combinada con las demas variables realizando una comparación con los resultados del primer orden jerárquico.

De igual manera estas variables procesadas fueron combinadas e intersectadas con los pesos relativos de la **Geoquímica**, obteniendo como resultado áreas de influencia que presentan variaciones en su radio de influencia, respecto a las áreas determinadas en la combinación anterior.

Como se puede observar en la Figura. V.7, la distribución para el Au se puede observar más ampliamente en la zona de Plomosas, Doñana y Mesa Chica así como áreas al norte de Mineral del Chico, principalmente en los poblados de San Sebastián Capulines y Pie de la Viga y algunas zonas en los poblados de Fray Francisco y San Jeronimo.

Las respuestas por Ag se observan en áreas más representativas de Plomosas en contacto con las rocas volcánicas y calcáreas, (Fig. V.8), así como áreas al NE de Mineral del Chico, parte central de Real del Monte y la parte NW de Pachuca. El Pb se distribuye ampliamente en la zona de Plomosas-Mesa Chica, areas al NW de Pachuca y Real del Monte (Fig. V.9).

El Cu se distibuye mas al NW de Plomosas y este del poblado Fray Francisco, SE del poblado de Santa Ana (Fig. V.10). Por su parte la distribución del Zn se presenta distribuido en Mineral del Monte y en una franja orientada E-W al este de San Sebastian Capulines (Fig. V.11).

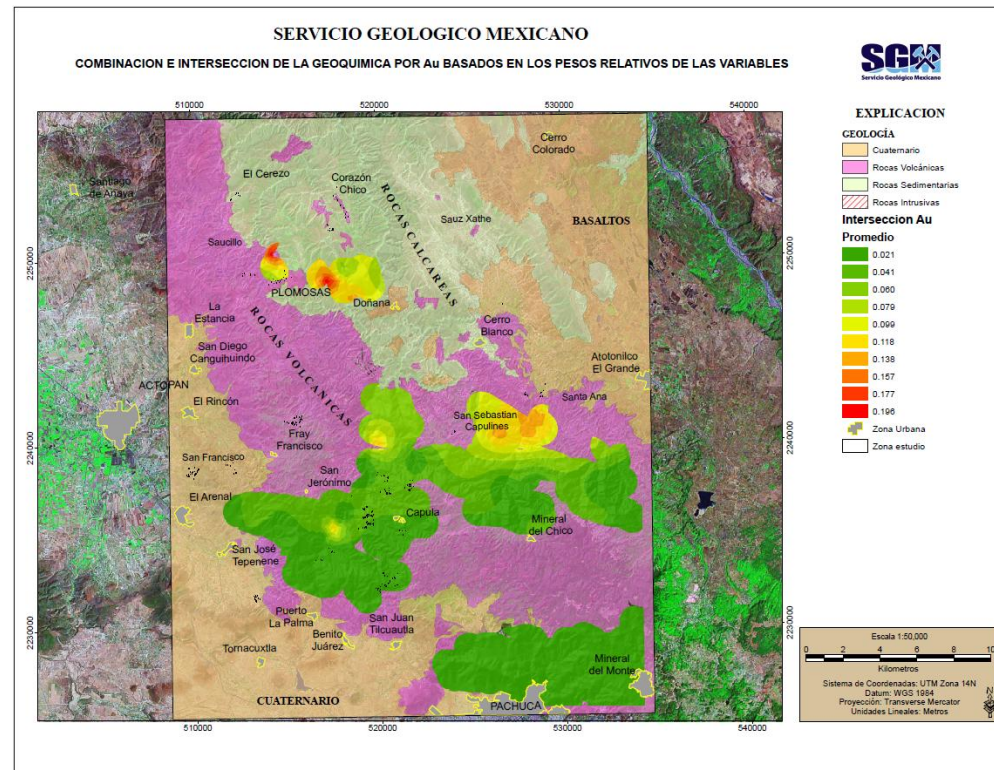
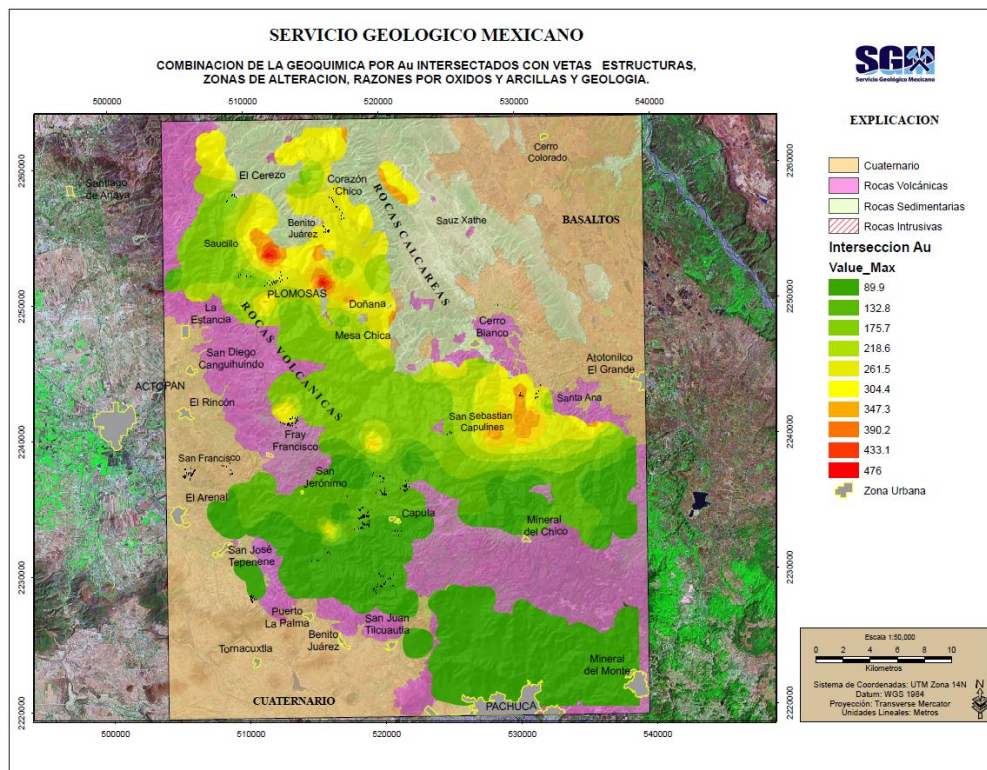


Fig. V.7. Comparación de las áreas anómalas del Au en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.
Izquierda: Combinación posterior con las variables vetas, estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología.
Derecha: Combinación anterior con las variables geología, zonas de alteración, estructuras y vetas.

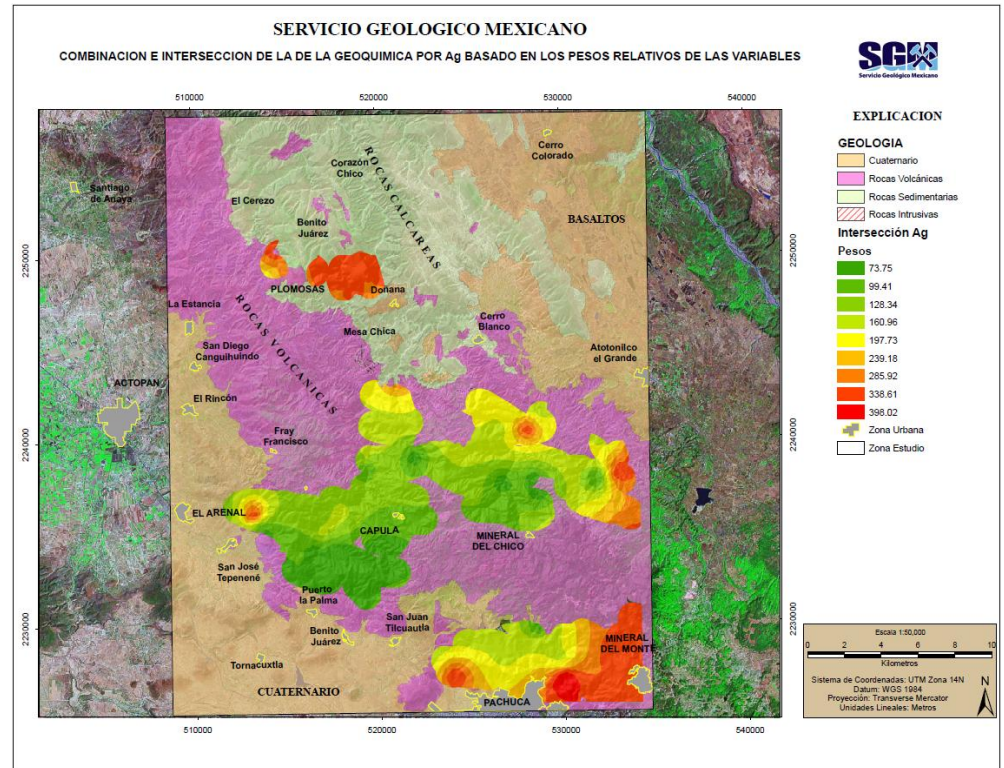
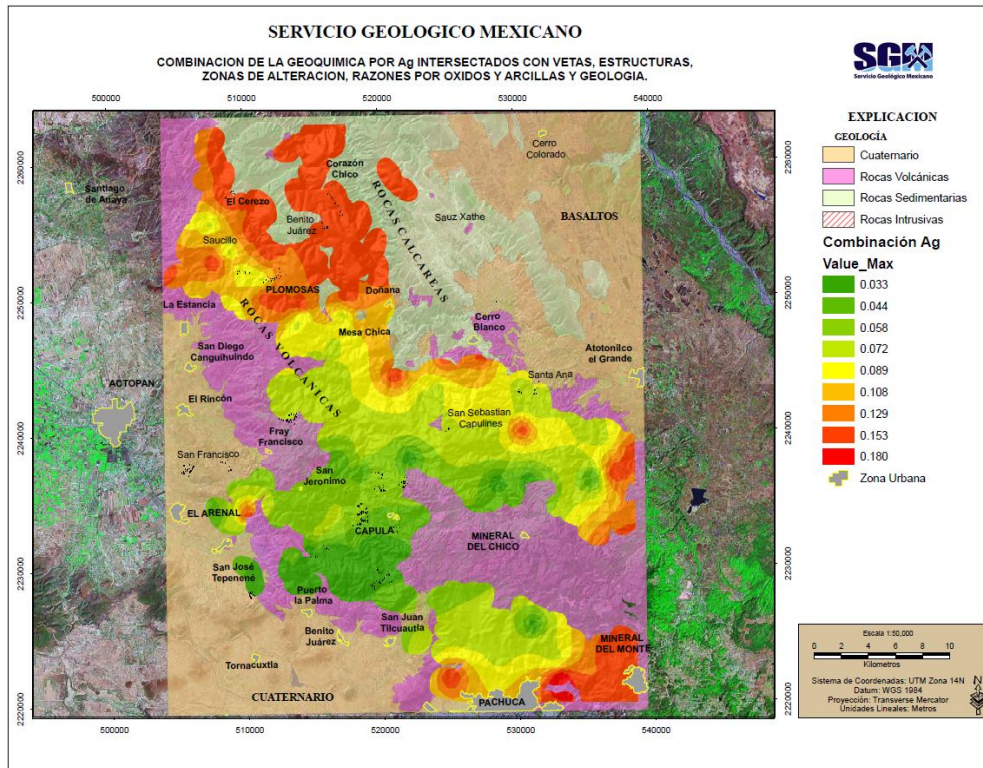


Fig. V.8. Comparación de las áreas anómalas de Ag en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.
Izquierda: Combinación posterior con las variables vetas, estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología.
Derecha: Combinación anterior con las variables geología, zonas de alteración, estructuras y vetas.

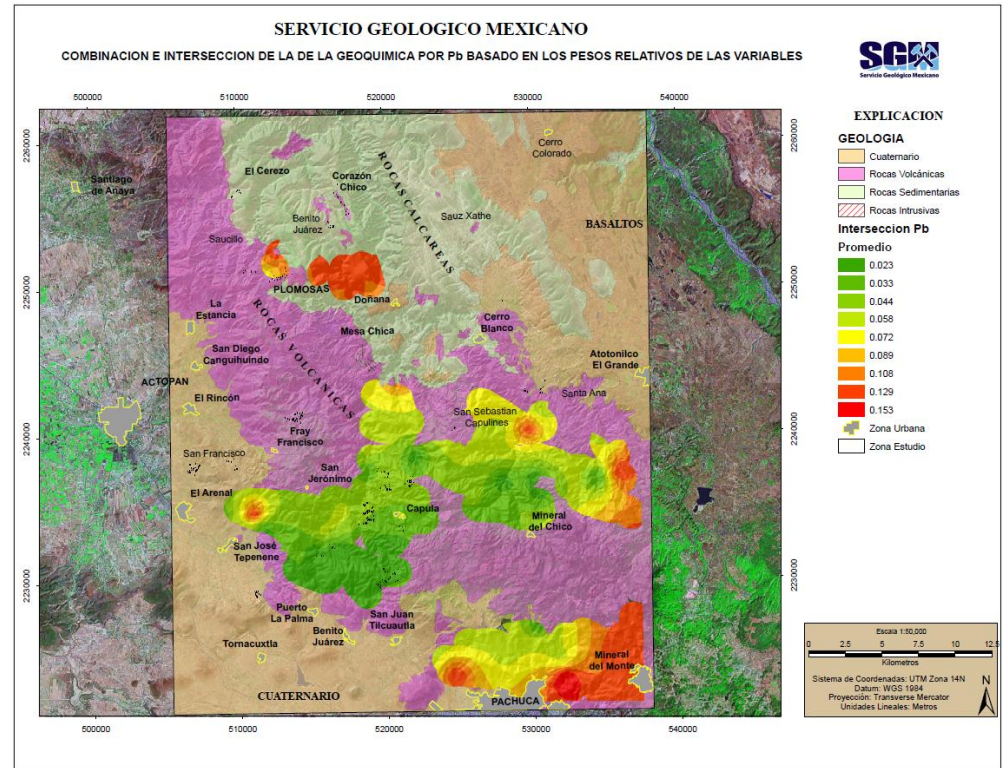
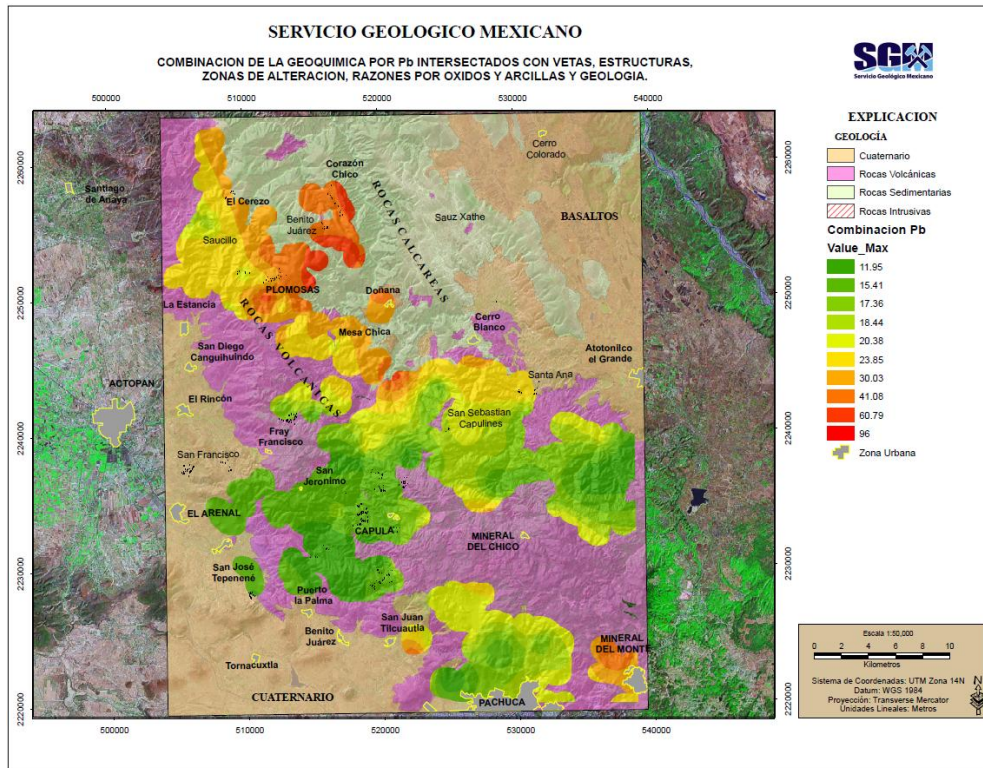


Fig. V.9. Comparación de las áreas anómalas del Pb en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.
Izquierda: Combinación posterior con las variables vetas, estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología.
Derecha: Combinación anterior con las variables geología, zonas de alteración, estructuras y vetas.

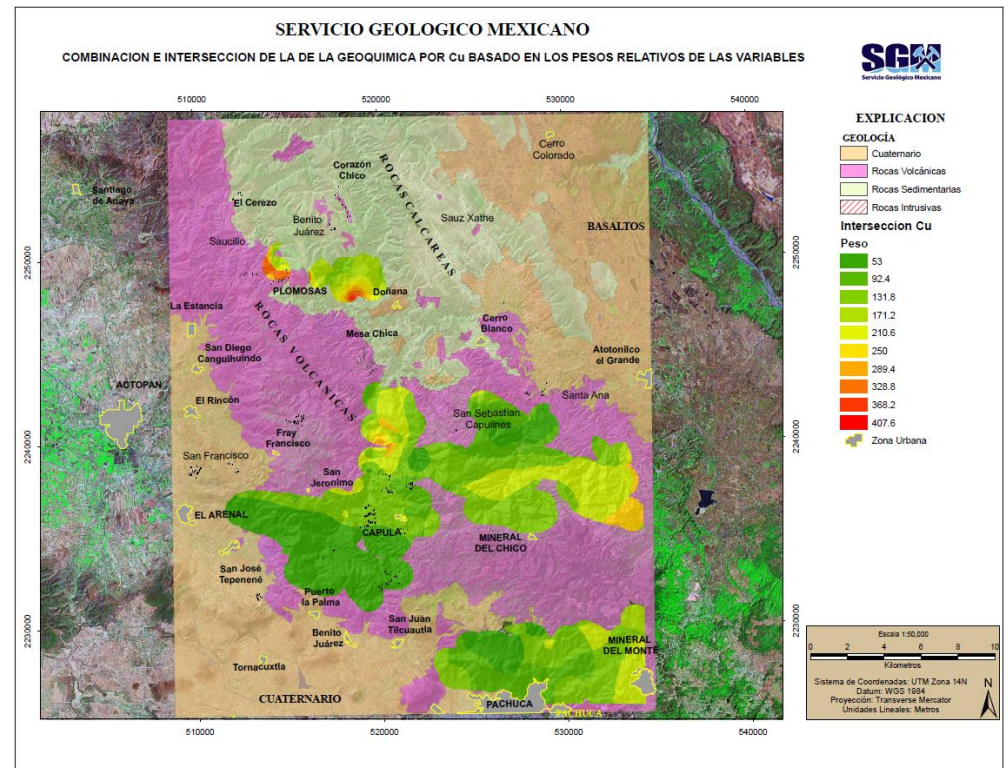
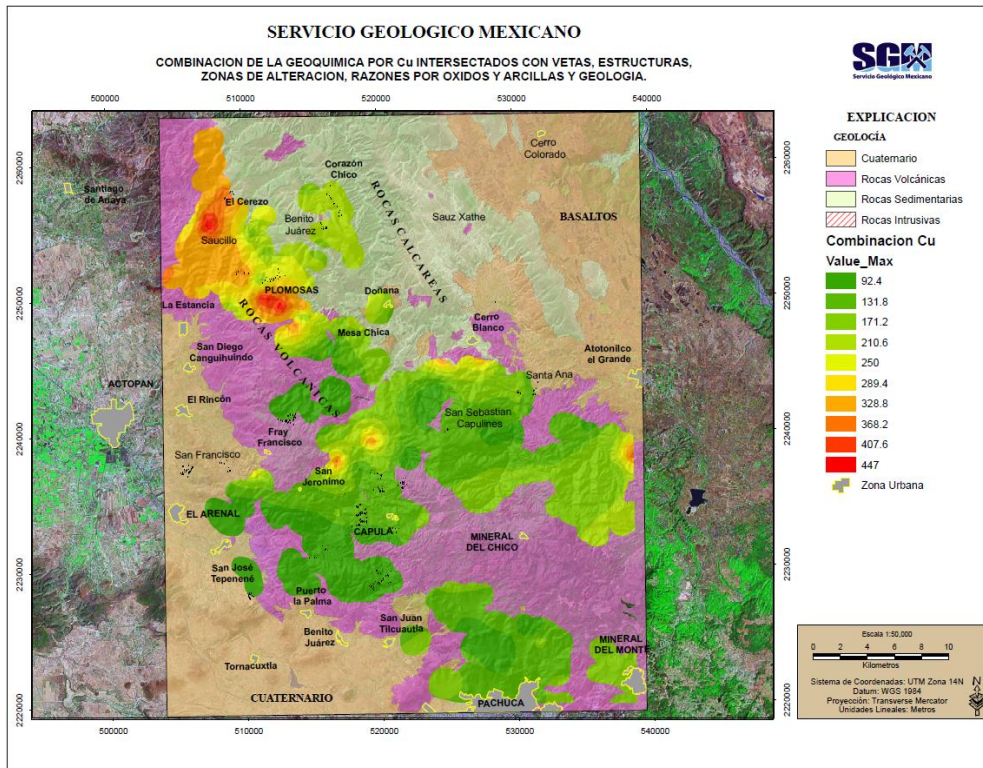


Fig. IV.10. Comparación de las áreas anómalas del Cu en diferentes jerarquías respecto al análisis anterior.
Izquierda: Combinación posterior con las variables vetas, estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología.
Derecha: Combinación anterior con las variables geología, zonas de alteración, estructuras y vetas.

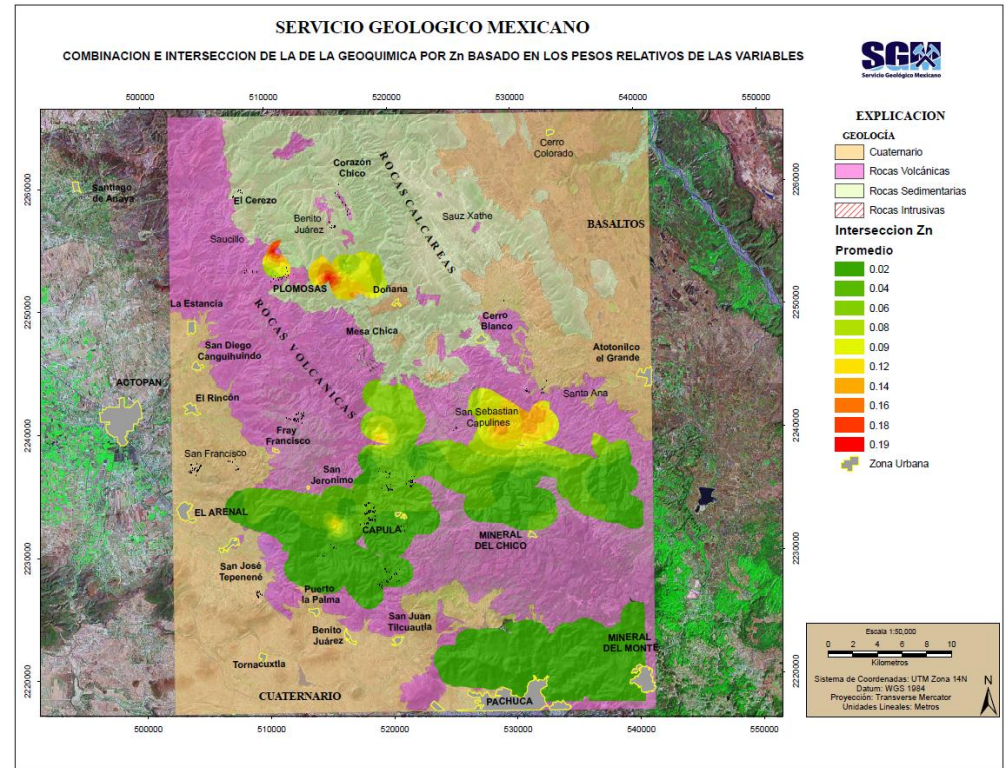
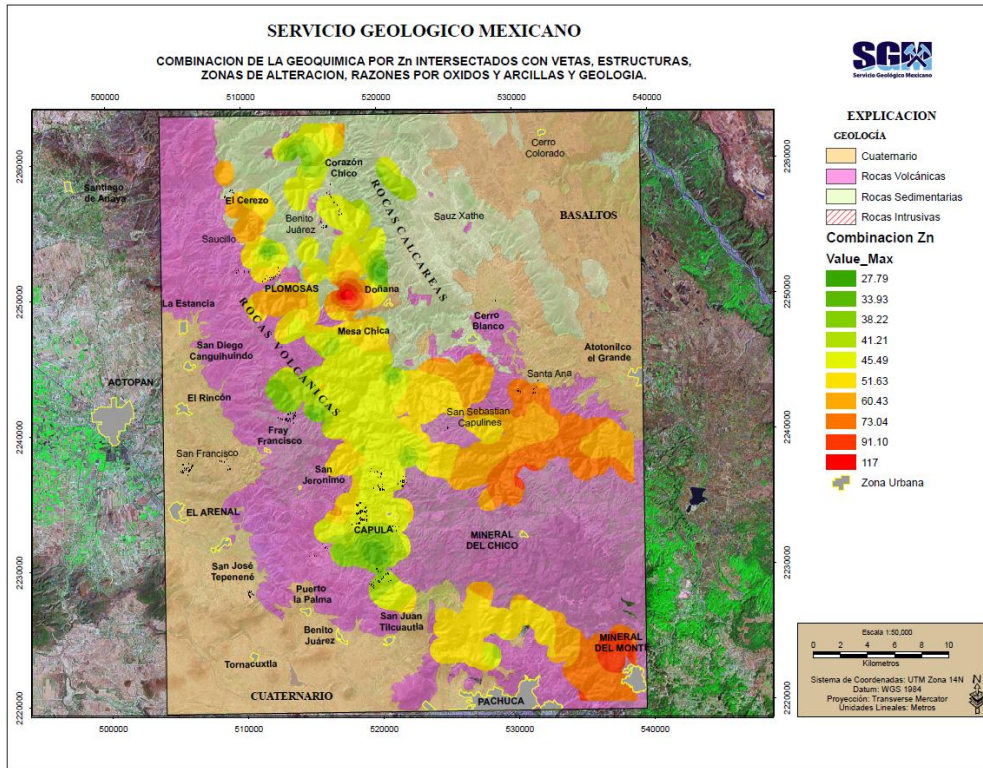


Fig. V.11. Comparación de las áreas anómalas del Zn en diferentes jerarquías, respecto al análisis anterior.
Izquierda: Combinación posterior con las variables vetas, estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología.
Derecha: Combinación anterior con las variables geología, zonas de alteración, estructuras y vetas.

Discusion de resultados.

Como se puede observar, las respuestas mostradas en cada una de las combinaciones siempre dependerá del manejo de las variables y de los pesos relativos de cada uno de los elementos, para obtener resultados que puedan ser validados y verificados en campo para su mejor confiabilidad. Por lo tanto el sistema de información geográfica permite mostrar áreas anómalas a partir de un análisis estadístico y analítico por una combinación e intersección de las diferentes capas de información.

La identificación de áreas prospectivas puede estar condicionada por diferentes patrones de búsqueda, a partir de cada uno de los atributos, ya sea estructurales, mineralógicos, origen, densidad, etc, para la obtención de nuevas áreas prospectivas o continuación de las mismas a partir de los datos ya existentes de una zona conocida, donde los criterios geológicos son determinantes para llevar a cabo este proceso analítico.

Así entonces como un apoyo auxiliar en las zonas delimitadas regionalmente, se realizó un análisis mediante un patron de búsqueda a traves de atributos de mineralización partiendo de las vetas que nos permitieran definir localmente areas prospectivas, en donde regionalmente no se pudo observar estas respuestas.

Mediante búsquedas avanzadas, se obtuvieron tres grupos de elementos principales para cada una de las zonas: Ag, Pb, Zn (Plomosas-Benito Juárez); Au, Ag, Pb (San Jose-EL Arenal-Capula, Mineral del Chico-San Sebastian Capulines) y Ag, Au, Zn (Pachuca-Real del Monte), como se mencionan a continuación:

Ag, Pb, Zn (Zona Plomosas-Benito Juárez).

En la Figura. V.12, se muestran las variables procesadas en combinación e intersección con los pesos relativos de la Geoquímica por el tipo de mineralización a partir de las vetas, donde se delimitaron areas prospectivas localmente apoyados por la parte estructural de las mismas con sus características geológico-mineras estructurales que a continuación se mencionan.

- 🚧 En esta región afloran principalmente rocas sedimentarias cretácicas principalmente calizas, lutitas, areniscas y rocas volcánicas del grupo Pachuca como tobas andesíticas y andesíticas del Oligoceno-Mioceno, donde se observan cuerpos mineralizados en forma de vetas con rumbos E-W con mineralización que contienen

sulfuros y oxidos de Pb y Zn.

- ✚ Las áreas mineralizadas están asociadas principalmente a las rocas calcáreas de la Fm. Doctor , ocupando cavidades de disolución del tipo de relleno de fisuras y fallas así como reemplazamiento selectivo por fluidos hidrotermales asociados quizás a la actividad magmatica que dio origen a las rocas del grupo Pachuca.
- ✚ Se han encontrado estructuras tabulares de calcita con leyes de Pb entre 0.32% a 24.7%; Zn 0.76 a 4.20%; y Mn 0.3 a 12.1%, con potencias promedio de 0.62 metros. En las rocas de caja de estas estructuras se han encontrado leyes de hasta 24.7 % de Pb y 0.9 % de Zn en los respaldos de estas estructuras.
- ✚ La mineralización encontrada en esta zona consiste en sulfuros argentíferos, sulfuros de Pb, Zn y Carbonatos, con alteraciones que se encuentran distribuidas ampliamente como zonas de oxidación provocadas por la actividad química oxidante y sulfuros primarios como la pirita, calcopirita, galena y argentita a oxidos hematíticos y limoníticos en las cercanías del nivel freático y en la superficie. La argilitización está representada por arcillas del grupo de la montmorillonita.
- ✚ Existen rocas intrusivas como cuerpos tabulares de diques riolíticos que se encuentran intruidas en las rocas Cretácicas y Terciarias, algunos con diseminación de pirita, con longitudes que varían de 200 a 2,000 m y potencias de 1 a 6 m. Estos no son muy abundantes en el área pero pueden estar asociados a vetas con mineralización de Ag, Pb, Zn y Au.
- ✚ Los principales rasgos estructurales son una serie de anticlinales y sinclinales, algunos de ellos recumbentes. El más característico y representativo es el anticlinal Cerro Blanco, orientado ligeramente al NW-SE con manteos suaves. En la parte central de esta área se encuentra el eje de un sinclinal recumbente con rumbo casi N-S buzando al oeste. Desde el punto de vista económico, en esta parte se han encontrado cuerpos mineralizados. Asimismo se encuentran fallas normales y fracturas con orientaciones NW-SE y NE-SW, y en el cruce de éstas pueden servir como zonas de debilidad para albergar mineralización.
- ✚ El plegamiento en las rocas calizas de la Fm. Doctor, producido por la Orogenia Laramide, ayudó más a la formación de zonas karsticas que después fueron rellenas,

principalmente cerca de los planos axiales de los pliegues, lugar donde el fracturamiento es más intenso debido a la plasticidad de las calizas.

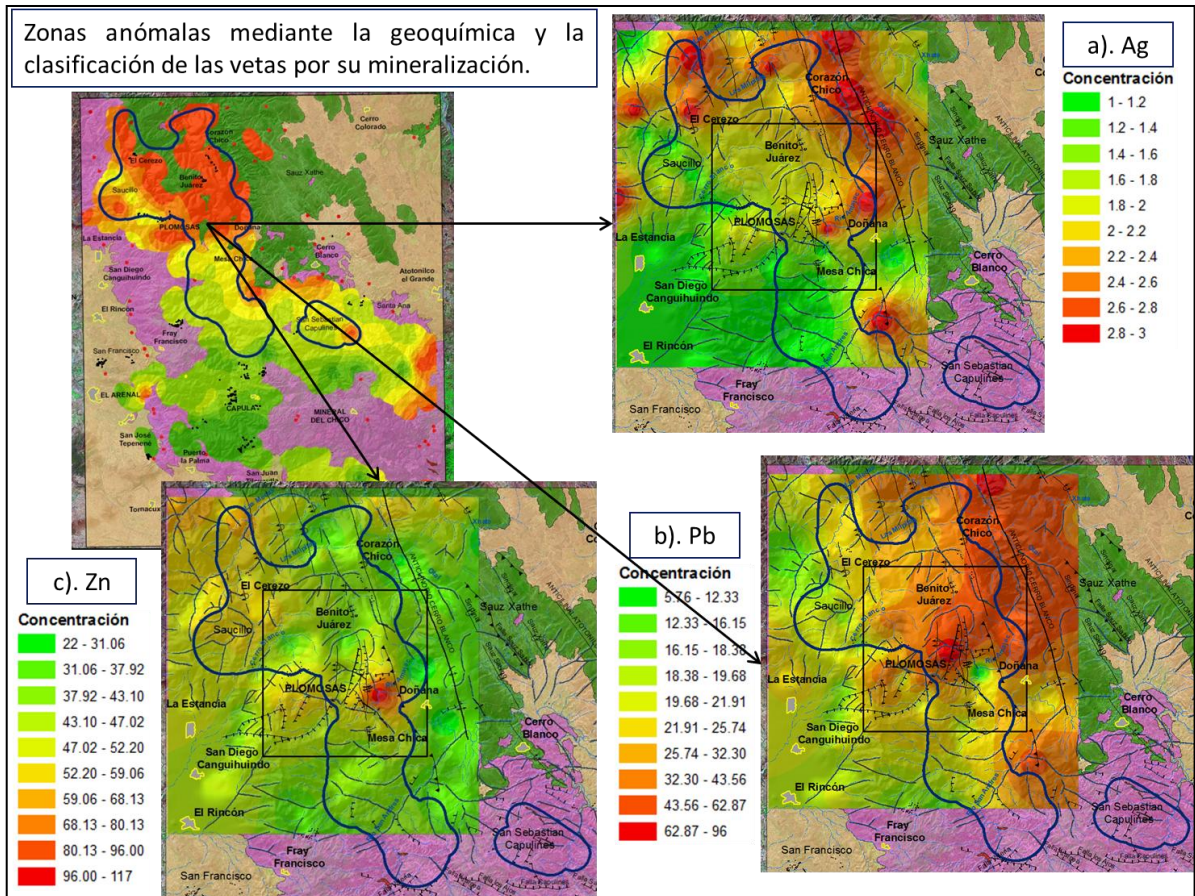


Fig. V.12. Delimitación de zonas anómalas por Ag, Pb, Zn en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área Plomosas-Benito Juárez.

Esta zona de Plomosas-Benito Juárez se hace interesante para un seguimiento y recomendarla como una zona prospectiva para estudio geológico de detalle, esto por las características antes mencionadas y hoy en día, con herramientas de vanguardia que combinan resultados de campo con esta metodología expuesta (AHP-Combinación con un SIG) poder identificar zonas mineralizadas localmente con posible potencial prospectivo.

Au, Ag, Pb (San José-EL Arenal- Capúla, Mineral del Chico-San Sebastian Capulines)

Para la zona **San José, El Arenal y Capula** las zonas delimitadas a partir de estas variables se presentan en la Figura. IV.13, calculadas a partir de las vetas con la geoquímica, tomando en cuenta su relacion mineralógica. Como se puede observar las zonas delimitadas representan una zonación más específica en cuanto al análisis jerarquico, presentando las siguientes características:

- Geológicamente esta zona está representada por rocas ígneas extrusivas de composición riolitica y andesitica de edad Terciario e intruidas por diques del Terciario Tardío, siendo el dique Arévalo–Capúla una de las principales estructuras que se observan en esta zona.

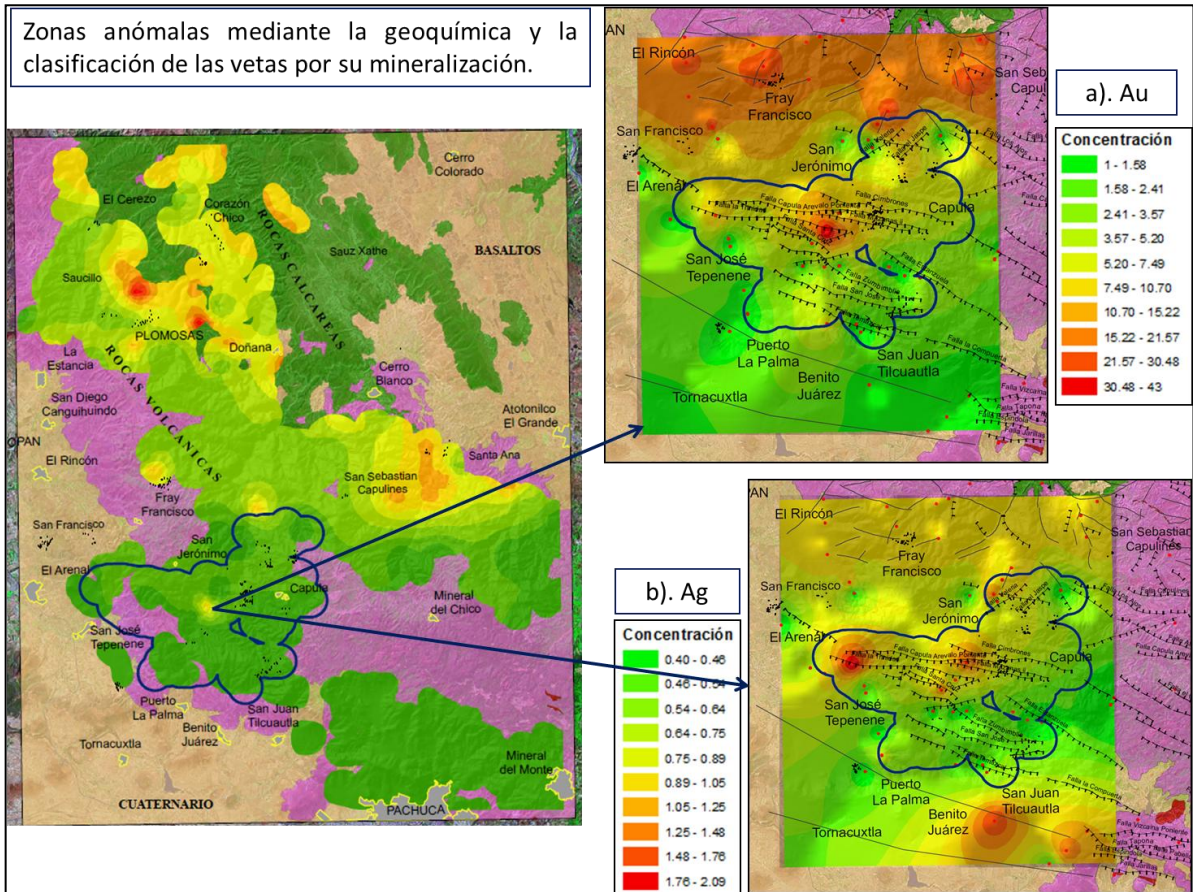


Fig. V. 13. Delimitación de zonas anómalas por Au, Ag, en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área El Arenal-San José-Capúla.

- ✚ La mineralización económica se encuentra en rocas del grupo Pachuca principalmente la Fm. Vizcaína (ToTA-Da) formadas por derrames andesíticos y dacíticos intercalados con tobas y brechas alteradas, donde se encuentran estructuras con espesor promedio de 1.25 m. y longitudes entre 1200 y 1900 m respectivamente, con leyes promedio de Au = 0.49 a 1.87 gr/ton. y Ag = 317 gr/ton.
- ✚ Las alteraciones presentes de mayor a menor importancia en esta zona son: **Silificación**, se encuentra ligada a las estructuras mineralizadas del área con presencia de cuarzo con relleno de espacios y fracturas con sulfuros; **Sericitización**, se encuentra constituida por abundante sericita, producto de la alteración de los feldespatos; La **Argilización**, se presenta en esta área, producto de la alteración de los silicatos de aluminio, particularmente feldespatos, formando intensos halos en la zona, y **Propilitización**, está compuesta por clorita, y epidota, producto de la alteración de feldespatos, piroxenos, anfíboles y biotita, presentándose en manchones irregulares de color verde aceituna.
- ✚ Las estructuras más importantes en esta área de estudio corresponden a la Falla-Dique Arevalo-Capula Poniente, La Trinidad, Cimbrones, estas con rumbo E- W a NW-SE, variando en potencias entre 0.20 a 8 m, con buzamientos hacia el sur y corridas entre 3 y 20 km (ej. Trinidad y Arevalo).

Para la zona **Mineral el Chico-San Sebastian Capulines**, sus respuestas se manifiestan en la Figura. IV.14, mostrando zonas de interés prospectivas localmente. Las siguientes características que se mencionan a continuación son representativas de estas áreas delimitadas.

- ✚ La unidad litológica de mayor extensión es la Fm. Vizcaina con potencias variables entre 200 a 400 metros, consistentes en derrames de lava andesítica, marcada por oxidaciones y sistemas de fracturamiento variables, siendo de mayor longitud y de carácter regional los orientados NW-SE. Estas están relacionadas con vetas-diques de similares dimensiones y edades posteriores, cuyas rocas huésped sirvieron de guía y receptoras de fluidos hidrotermales mineralizantes postumos.
- ✚ Existen una serie de diques de composición félsica distribuidos semiparalelamente al patrón principal de las fracturas, cortando las rocas volcánicas de edad terciaria.

✚ La mineralización se encuentra en vetas de cuarzo principalmente en las rocas huésped, a lo largo de fallas donde condiciones locales favorecieron el desarrollo de éstas. Se encuentran sulfuros como la argentita, galena, esfalerita, calcopirita y pirita, ocurriendo en vetillas con cuarzo de grano grueso.

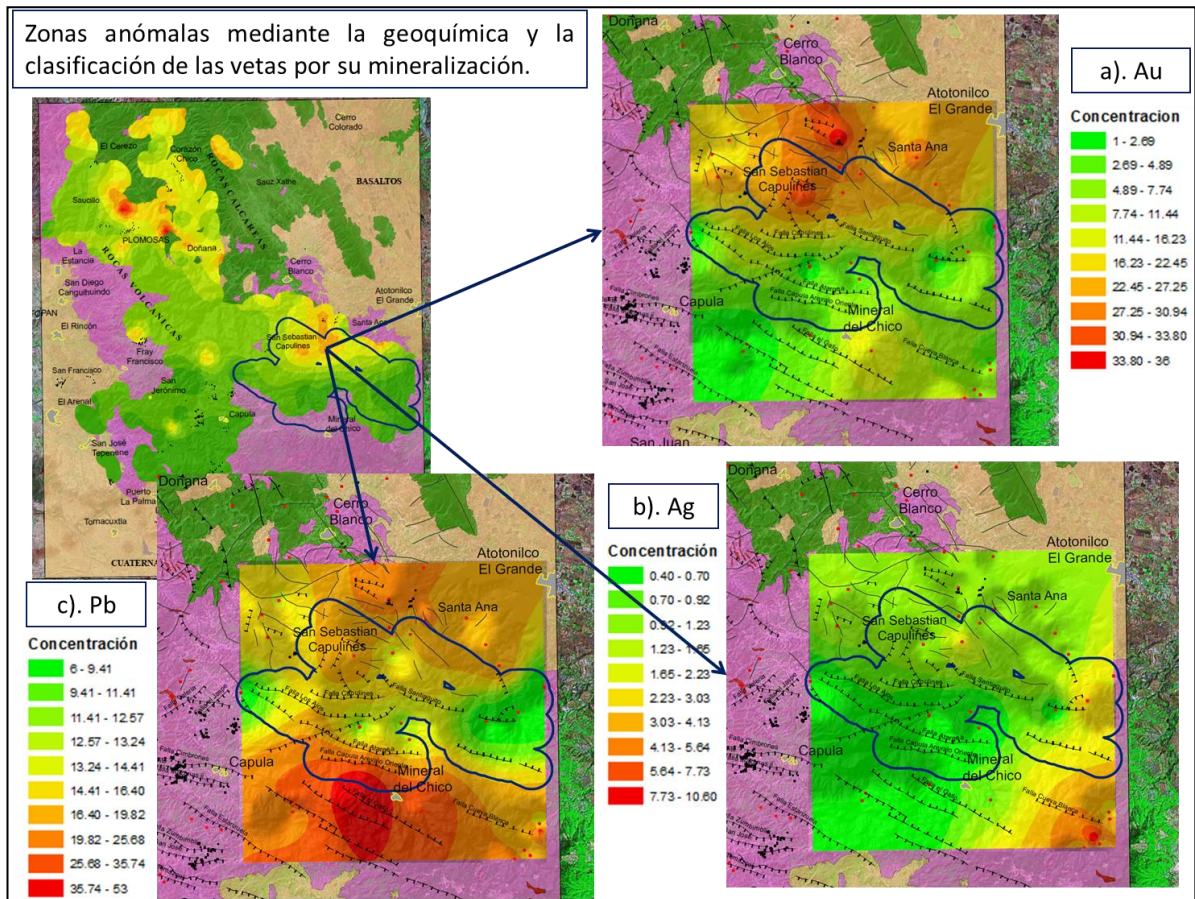


Fig. V.14. Delimitación de zonas anómalas por Ag, Au, Pb en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área San Sebastián Capulines-EI Chico.

✚ Todas estas rocas se encuentran alteradas por efectos de una silicificación y una propilitización de moderada a intensa, acompañadas de oxidación en las zonas de fracturamiento, por lo que se considera que la mineralización, en caso de encontrarse debe estar aproximadamente a 300 metros más o menos de la superficie, tomando como guía el juego de elementos tectónicos (fallas y fisuras) que afectan esta zona formando fallas escalonadas, pilares y fosas tectónicas y localmente algún fallamiento inverso.

- ✚ Se han encontrado vetas con leyes de Au = 2 a 2.5 g/t y de Ag = 200 a 800 g/t. Las potencias varían entre 1.4 a 2.0 metros, con corridas (longitudes) que van de 250 a 2500 metros. Las rocas de caja de estas vetas mineralizadas se encuentran en rocas de la Fm. Vizcaína, principalmente andesitas y dacitas, pertenecientes al Grupo Pachuca.
- ✚ El sistema estructural de esta zona de igual manera está representado por estructuras locales con dirección NW-SE, la estructura regional con mayor longitud está representada por la veta-falla Capúla-Arevalo Oriente con una corrida (longitud) de 3 km, delimitada al norte por diques de pórfido cuarífero con la misma dirección y buzando hacia el sur.

Por lo consiguiente las áreas delimitadas mediante estos ponderadores y criterios jerárquicos manejados de esta forma selectiva nos permite delimitar áreas en donde, posiblemente se puedan presentar evidencias mineralógicas no observadas mediante los criterios jerárquicos.

Ag, Au (Pachuca-Real del Monte)

Por su parte las respuestas de la mineralización obtenidas a través del proceso de búsqueda, se presentan en zonas que son conocidas actualmente y que en su momento fueron zonas de explotación principalmente por Ag, Au.

Para estas áreas se deduce que probablemente las vetas mineralizadas tengan continuación hacia zonas más profundas principalmente en la parte N-NW de Real del Monte y estén cubiertas por brechas volcánicas y dacíticas de la Fm. Zumate más recientes, que sobreyacen a la Fm. Vizcaína (TsTA-Da) Fig. IV. 15.

Por su parte en la parte NW de Pachuca también se observan respuestas que se encuentran en el límite del contacto entre las rocas volcánicas de la Sierra de Pachuca con las rocas cuaternarias y probablemente las estructuras mineralizadas se encuentren desplazadas por algún fallamiento encontrándose en bloques caídos, cubiertas por las rocas volcánicas más recientes.

Otro de los factores que ha impedido realizar exploración en estas áreas, es que el límite norte de Pachuca-Real del Monte se encuentra delimitada una zona de reserva nacional ecológica, motivo por el cual las empresas mineras desistieron de estas áreas.

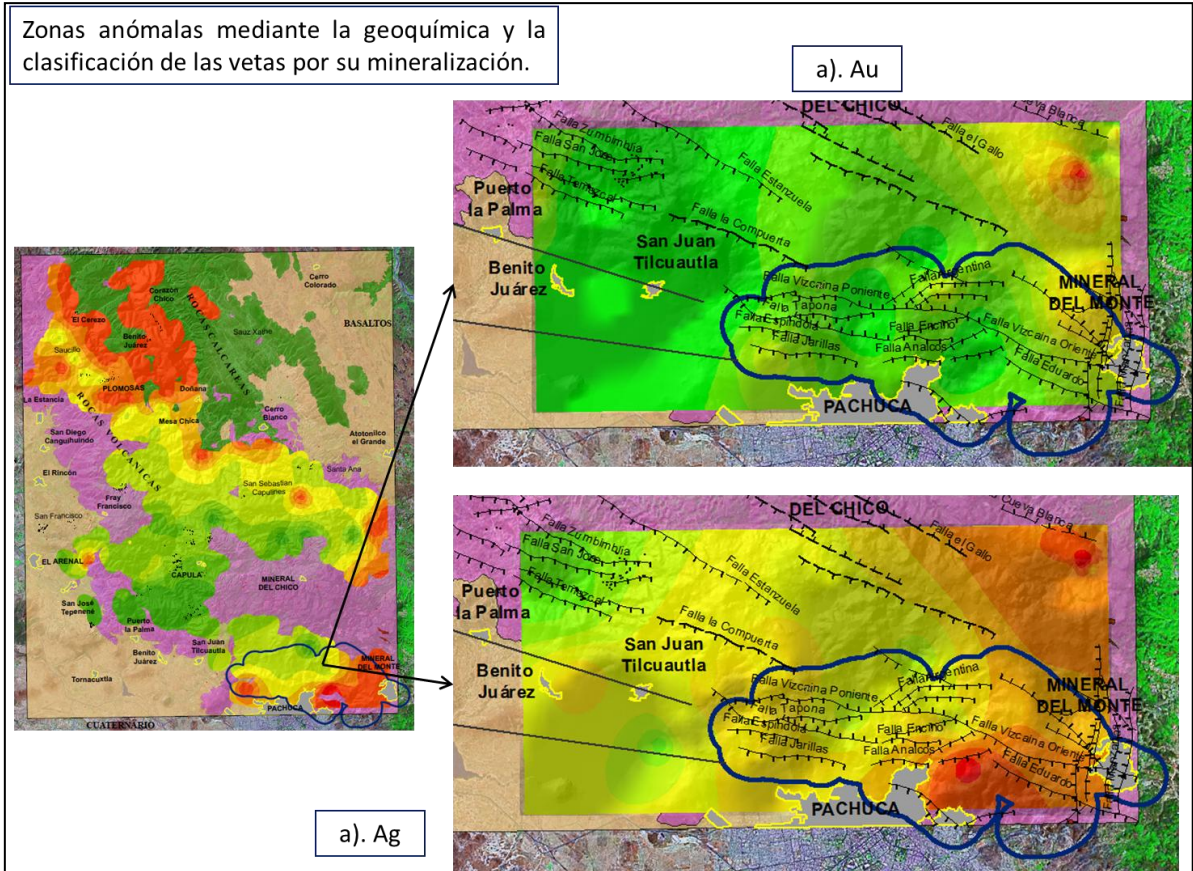


Fig. V. 15. Delimitación de zonas anómalas de Ag, Au en combinación e intersección con la Geoquímica a partir de las vetas por su importancia mineralógica y los pesos relativos de las estructuras, zonas de alteración, razones por óxidos y arcillas y geología, área Pachuca-Real del Monte.

Finalmente como resultado del proceso analítico y el cambio de ponderadores en los criterios, usando como ponderador principal las vetas con su relación mineralógica con la geoquímica y las demás capas de información, se puede deducir que el resultado analítico muestra zonas prospectivas a un nivel regional que sirven como patrón y guía para efectuar un seguimiento de prospección a mayor detalle.

El segundo procedimiento permitió efectuar con mayor detalle la confirmación de áreas prospectivas más representativas a través de los patrones de búsqueda utilizando ponderadores específicos, como en este caso el tipo de mineralización de las vetas, apoyado de la geoquímica a detalle y el nivel estructural. Este proceso nos permitió localizar grupos de minerales locales en cada una de las zonas determinadas regionalmente permitiendo

ubicar localmente áreas mas especificas con sus características principales ya mencionadas.

Estos resultados obtenidos fueron complementados y apoyados con los niveles geológicos-mineros, estructurales, vetas, zonas de alteración y herramientas auxiliares como la geofísica y el apoyo de imágenes como las razones a partir de imágenes satelitales que nos permitieron visualizar y delimitar las áreas prospectivas.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

VI.1. Conclusiones.

Este trabajo permitió identificar áreas de interés prospectivo procesando, en un Sistema de Información Geográfica (SIG), datos geológico-mineros de carácter regional existentes en el Servicio Geológico Mexicano.

Se desarrolló una metodología a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) combinando una serie de variables geológicas-mineras a las que se asignaron pesos relativos por un proceso de análisis Jerárquico (AHP) y criterios geológicos de exploración.

Las variables utilizadas se determinaron por criterios geológicos, apuntando una prioridad de primer orden aquellas variables con ocurrencias de mineralización para la prospección de minerales metálicos. Asimismo se le dio una importancia de interés especial al procesamiento de los datos geoquímicos de sedimentos de drenaje, procesados estadísticamente.

Se efectuaron tres procesamientos de acuerdo a las variables de información analizadas, cuyos resultados fueron los siguientes.

Primer proceso. Los análisis efectuados en combinación con los procesos estadísticos y analíticos generaron zonas prospectivas que coinciden con áreas de mineralización epitermal conocidas, lo que valida la metodología utilizada durante el proceso.

Se identificó una zona en donde el desarrollo a nivel minero es poco notable, pero de acuerdo al análisis efectuado es una zona con probable potencial minero para un desarrollo a nivel prospectivo para contener mineralización.

Las áreas delimitadas e identificadas por este proceso a través del SIG fueron las siguientes zonas: Plomosas-Benito Juárez, Mineral del Chico-San Sebastián Capulines, San José Tepenené-El Arenal-Capúla y Pachuca Real del Monte.

Segundo Proceso. Se efectuó un cambio de ponderación en las variables utilizadas durante el proceso para observar las variantes en las zonas determinadas. Con este cambio, las áreas identificadas mantienen su distribución en términos generales, pero algunas áreas amplían su extensión de acuerdo a las variables primordiales durante el proceso. Por lo tanto

esto indica que el criterio geológico al escoger las variables a analizar, es relevante para el resultado del procesamiento.

Tercer Proceso. Como un procedimiento adicional, partiendo de la mineralización de datos locales de las vetas, así como datos estructurales y geoquímicos nos llevó a través de intersección y combinaciones a definir zonas más representativas, respecto al procedimiento que fue elaborado regionalmente, en las cuales los resultados corresponden a zonas en las que puede existir mineralización en forma de vetas con presencia de Ag, Au, Pb, Cu y Zn.

Todos estos procesos dieron como respuesta zonas anómalas que presentan similitudes en áreas de interés delimitadas a nivel regional por Ag, Au, Pb, Cu y Zn, y distribuidas de una forma más localizada, como resultado de la combinación e intersección de la información geológico-minera a través de cada uno de los procesamientos.

Cabe señalar que la metodología expuesta puede servir para cruzar información en las zonas de mineralización conocidas, de manera de poder definir patrones de búsqueda a través de los múltiples atributos de cada una de las capas de información y aplicarlos a zonas conocidas y desconocidas. Estos patrones en respuesta pueden variar según los criterios o los diferentes ambientes de formación geológico-minera, por lo tanto el criterio del geólogo es muy importante para definir la selección adecuada de las variables.

Las características geológicas-mineras, estructurales y mineralógicas presentes en cada una de las zonas, son factores importantes como la parte norte donde se presentan rocas calcáreas de edades cretácicas de la Fm. Doctor, favorables por mineralización con presencia de estructuras como fallas, fracturas, anticlinales y sinclinales presentando mineralización cerca de los planos axiales de los pliegues.

Asimismo las otras zonas de origen volcánico presentan rocas de edad terciaria como la Fm. Vizcaína, consistente en derrames de lava andesítica, marcada por oxidaciones y sistemas de fracturamiento variables orientados al NW-SE, relacionados con vetas-diques de dimensiones considerables y edades posteriores, cuyos respaldos (roca caja) sirvieron como guías receptoras de mineralización.

VI.2. Recomendaciones.

- Una de las recomendaciones principales que se pretende es proponer y aplicar esta metodología para las áreas propuestas que tiene el SGM en el país, y ser complementada con datos actualizados de campo para dar mayor veracidad a los datos calculados.
- Basado en esta metodología, se busca la forma de aplicarla en proyectos a futuro dentro de la institución, principalmente en áreas de exploración minera en base a información geológica-minera existente, apoyado y validado siempre con verificación de terreno.
- Hoy en día la prioridad dentro de la empresa es la búsqueda de nuevos prospectos de exploración minera en zonas donde las condiciones geológica-mineras sean propicias y libres de denuncia, por lo que es recomendable buscar nuevas áreas implementando herramientas de prospección y combinar los datos con este proceso. Cabe señalar que este método ayuda en primera instancia a delimitar áreas potencialmente prospectivas con datos existentes de una zona en estudio para proponer y priorizar sus resultados a las áreas especializadas para su continuidad y verificación preliminar en el terreno.
- Por lo que respecta a las zonas establecidas, se recomienda efectuar un estudio geológico-geoquímico a detalle o semi-detalle de la zona determinada como Plomosas-Benito Juárez, esto por las características geológicas mencionadas, realizando nuevos muestreos de roca así como un programa de muestreo de sedimentos de arroyo.

VII. REFERENCIAS

- Aguilar, J. G. y O., Ezequiel, 1897, Geología General de la Sierra de Pachuca, en Aguilera, J. G. y otros, 1897.
- Arellano-Gil, J., Velasco-De León, P., Silva-Pineda, A., Salvador-Flores, R., Beltrán-Romero, F., 2005, Origen y características del paleo-lago de Amajac, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 2, p. 199-211.
- Argote, D. L., 2008. Modelación en 3D de datos magnéticos para caracterizar estructuras geológicas, UNAM.
- Aronoff, S., 1989, *Geographic information systems: a management perspective*: Ottawa, Canada, WDL Publications, 294 p.
- Black R. F., Geyne A. R., Fries, Jr. C., Segertrom, K., e I. F. Wilson, 1963. *Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México*.
- Baldomero E., Carrasco-Velázquez, P., Morales-Puente, E., Cienfuegos y R. Lozano-Santacruz, (2004). Geoquímica de las rocas asociadas al paleokarst cretácico en la plataforma de Actopan: evolución paleo hidrológica. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21, núm. 3, p. 382-396.
- Bastin, C. J., 1948, Mineral relationships in the ores of Pachuca and Real del Monte, Hidalgo, México: *Economic Geology*, v 43, p. 53-65.
- Berry, J.K., 1993, *Beyond Mapping: concepts, algorithms, and issues in GIS*: Fort Collins, Colorado, USA, GIS World Books, 266 p.
- Bonham-Carter, G.F., 1994, *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*: Ottawa, Canada, Pergamon, 398 p.
- Buchanan L. J. and Durning W. P, 1990, *exploration potencial in the greater Pachuca Real del Monte district*, Hgo., Mexico, Fischer Watt Gold Co. Inc.
- Burrough, P.A., 1986, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*: Oxford, Reino Unido, Clarendon Press, 194 p.
- Carta Geológica Minera Actopan F14d71. "Informe final complementario a la cartografía geológico-minera y geoquímica escala 1:50,000", de la hoja Actopan F14-D71.
- Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81, escala 1:50,000, Estado de Hidalgo.
- Carta Geológica de México, escala 1:2, 000,000 6ª edición 2007.
- Carta Magnética "Hoja Pachuca" F14-11 estados de Hidalgo, Querétaro, Veracruz, Puebla y México escala 1:250,000.

- Chacón J., Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Springer-Verlag. Department of Civil Engineering, University of Granada, Granada, Spain.
- Chica-Olmo, M., Abarca, F., Rigol, J.P., 2002, Development of a Decision Support System based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain: *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4801-4814.
- Damon, P.E., Shafi Ullah, M.; Clark, K.O.F. (1981). Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis. *Universidad Autónoma de México, Inst. Geología, Revista*, vol. 5 núm. 2, P. 233-238.
- Demant, A., 1978. Características del eje Neovolcánico Transmexicano; sus problemas de interpretación: *Univ. Nac. Autón. México, Inst. Geología, Revista*, v. 2, P. 172-187.
- De los Santos, M. J., 1996, Informe de Geología a semidetalle-detalle, realizada en el proyecto "Santa Ana", localizado dentro de la zona de reserva mineral nacional "Pachuca Tres", municipio el Arenal, estado de Hidalgo.
- Eguiluz de Antuñano S. M. Aranda García and R. Marret, *Tectónica de la sierra Madre Oriental, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53 (2000), pp. 1-26.
- Espinoza, M, Silva S. 1980: Exploración geológico-minera en el distrito de "Plomosas, Hidalgo."
- García, J., Martínez, J. J. 1959:- La Utilidad De La Geofísica Aplicada Como Auxiliar En La Exploración De Los Yacimientos Argentíferos de Pachuca Y Real Del Monte, Hidalgo.
- García, P., Frías, M. Á. 1988. Informe geológico regional del Proyecto Santa Lucía Tepenené.
- Geyne A. R., Fries, Jr. C., Segertrom, K., R. F. Black e I. F. Wilson, 1963. *Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México.*
- Geyne, A. R. y Wilson, I. F., 1951 (1952). Relación entre los cuerpos de mineral costeable y los diques en el distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México (Resumen): *Conv. Interamericano de Recursos Minerales, Primera, México 1951. Y Mem.*, p. 270.
- Guiza, S. Y., Cedeño, C. J., González, J., 1999. Análisis de la dispersión geoquímica de metales traza en el río Magdalena-Sector Simiti-Regidor (Sur de Bolívar)
- Gómez, J. A., Ramos, S. G., 1980:- Levantamiento Geológico-Geoquímico de detalle en el área Paricutín-Pachuca, Dto. De Pachuca-Real del Monte, Edo. De Hidalgo.

- Gómez, J. A., Ramos, S. G., Mireles y M. A, Quezada G. J. J., Salas V. J. G., Cantero A. F. 1983. Estudio geológico-geoquímico por vapores de mercurio en el área San Sebastián-Santiaguito, el Chico, Hgo. 32 P.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., and Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicano. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 57, 227-284.
- González, J. A., Patiño, J. A., 1987: Informe sobre las alteraciones existentes en las inmediaciones de la Mina "La Trinidad", Proyecto Santa Lucía Tepenené (C.R.M).
- Goldschmidt, V. M. 1954. Geochemistry. Oxford. London.
- Huitron, R., Silva, S., 1979. Informe de Avances de los trabajos geológicos – Mineros del distrito de "Plomosas, Hgo." 22 P.
- Isaaks, E.H.; Srivastava, R.M. (1989), Applied Geostatistics. New York, Oxford University Press, Inc.
- Levinson, A. A., 1980. Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publishing Ltd. Second Edition, 924 pp.
- Lee, J. L., Benítez, J. A., Cruz R., 1974, Informe de avance de trabajos geológicos y geoquímicos en la región el Chico-Capula, Hgo, Consejo de Recursos Minerales.
- Liévano, C. 1981. Yacimientos Paleo kársticos
- López Ramos E. 1980. Geología de México Tomo II 2ª Edición.
- López Ramos E., 1983. "Geología de México" Tomo III 3ª Edición.
- Mayor-Gallego, J.A., 2004, Estadística Descriptiva, Diplomatura de Estadística. Curso 2004-2005: Sevilla, España, Facultad de Matemáticas y estadística.
- McKee, E.H., Dreier, J.E., and Noble, D.C., 1992. Early Miocene hydrothermal activity at Pachuca-Real del Monte, Mexico: an example of space-time association of volcanism and epithermal Ag-Au mineralization. Economic Geology 87, 1635-1637.
- Mooser, F., 1975, Historia Geológica de la Cuenca de México, en Memoria de las Obras de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México D.F., Departamento del Distrito Federal, 38 p.
- Negendank J. F. W., 1972.-Volcanics at the Valley of Mexico. N. Jb. Miner Abh., 116, p.308-320.
- Nolasco L., 1982, Trabajos realizados gastos efectuados y resultados obtenidos en 1982, Consejo de Recursos Minerales.

- Picardo, F. 2008, Variables discretas ordenadas (Análisis de Concordancia de atributos).
- Plant, J., Slater, D., 1986. Regional geochemistry-potential developments. Trans. Inst. Min. Metall., 95, B73-B70.
- Plant, J., Tarney, J., 1994. Mineral deposit models and primary rock geochemical characteristics. In M. Hale and J. Plant (Eds.). Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry, 6. Elsevier, 11-72.
- Publicación 5E. Geología y Yacimientos Minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México. A.R. Geyne, Carl Frías, Jr. Kenneth Segerstrom
- Raisz, E. 1964. Landforms of Mexico (chart). Geography Branch of the Naval Research. 2^o ed. Cambridge, Mass. USA.
- Ramos, S. G., Mireles P., 1982. Informe Final del área la Negra, Edo. de Hidalgo, Estudio realizado para el proyecto Plomosas-Actopan.
- Ramos, S. G., Mireles, P., Revilla M. J.L., 1980. Levantamiento geológico -geoquímico por vapores de Mercurio en las áreas Pachuca y Atotonilco, estado de Hidalgo.
- Rigol-Sánchez, J.P., 2000, Aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en exploración minera: Granada, España, Universidad de Granada, tesis doctoral, 415 p.
- Ross, S.M. 2007, Introducción a la Estadística. Edición en español, traducido por. Sánchez, T.V., Barcelona, Editorial Reverté, S.A.
- Rose A.; Hawkes, H.; Webb, J. 1979. Geochemistry in mineral explorations. 2^a ed. Academic Press. London, N-York etc. 657 p.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., M. Duris, Fordyce, F.M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J.O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'Connor, P., Odor, L., Ottonello, G., Paukola, T., Plant, J.A., Reimann, C., Sherman, O., Siewers, U., Steenfelt, A., Sluys, J.V.d., y Williams, L., 1998, FOREGS geochemical mapping. Field manual. Geologian tutkimuskeskus, Opat - Geological Survey of Finland, p. 36 pages.
- Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York. Reprinted in 1996 by RWS Publications, Pittsburgh.
- Segerstrom K., Frías C. y Geyne A.R. (1963) Geología y Yacimientos Minerales del Dto. Pachuca-Real del Monte, Edo. de Hidalgo, Publicación 5E del C.R.N.N.R.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos división de Recursos Biológicos del USGS. Una versión gráfica del Estándar de Contenido de Metadatos digitales Geoespaciales

- Versión 1998 (FGDC-STD-001 Junio 1998). Servicio Geológico de los Estados Unidos
División de Recursos del USGS.
- Stigler, S. M. (2008), Karl Pearson's Theoretical Errors and the Advances They Inspired.
Statistical Science, Vol. 23, No. 2, pp. 261–271.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution,
Blackwell, Oxford.
- Texto Explicativo Carta Geológica de México Escala 1:2'000 000 6ª Edición 2007, editado
por el SGM. P. 12
- Valverde R. Jaime, Peza Guevara Rolando, 1981, Informe final de los trabajos realizados en
el proyecto mar de plata, durante el año de 1981. , Consejo de Recursos Minerales.
- Vázquez M. E., Pérez M. A., Ovando H., Hernández, N., 1981. Informe de avance Enero-
Diciembre. Proyecto "Plomosas, Hgo."
- Vázquez M. E., Pérez M. A., 1982: Informe de avance enero-diciembre 1982. Proyecto "
Plomosas, Hgo".
- Vélez, J., 2010. Interpretación aeromagnética (SGM).
- Villegas J. C., Vélez López J., 1975. Levantamiento Electromagnético en el área Herradura
(SW, CENTRO, NE) Distrito Minero de Pachuca, Hgo. 17 P.
- (Wisser, E., 1948, Mineral relationships in the ores of Pachuca and Real del Monte, Hidalgo,
México a reply: Economic Geology, v.43 p. 280-292.

ANEXOS

Anexo I.

IA. Plano geológico estructural de la zona Actopan-Pachuca, escala 1:60.000.

Anexo II

Generación de Metadatos para el Sistema de Información Geográfica (SIG)

Anexo III (CD adjunto)

(Archivos en formato PDF)

INDICE DE FIGURAS

Fig. IA. Mapa geológico estructural Actopan-Pachuca.	147
Fig. II.1. Diagrama de una estructura para la elaboración de un metadato, sección 1, 2, 3, 4, (Fuente USGS, 1998)	149
Fig. II.2. Continuación de la estructura para la elaboración de un metadato en su sección 5, 6, 7 (Fuente USGS, 1998).	150
Fig. II.3. Estructura final del metadato con las siete secciones de la zona de estudio Actopan-Pachuca.	151

Anexo I

Mapa geológico estructural de la zona de estudio a nivel regional de la zona de estudio representado a una escala 1:60.000, para su impresión real Fig. IA.

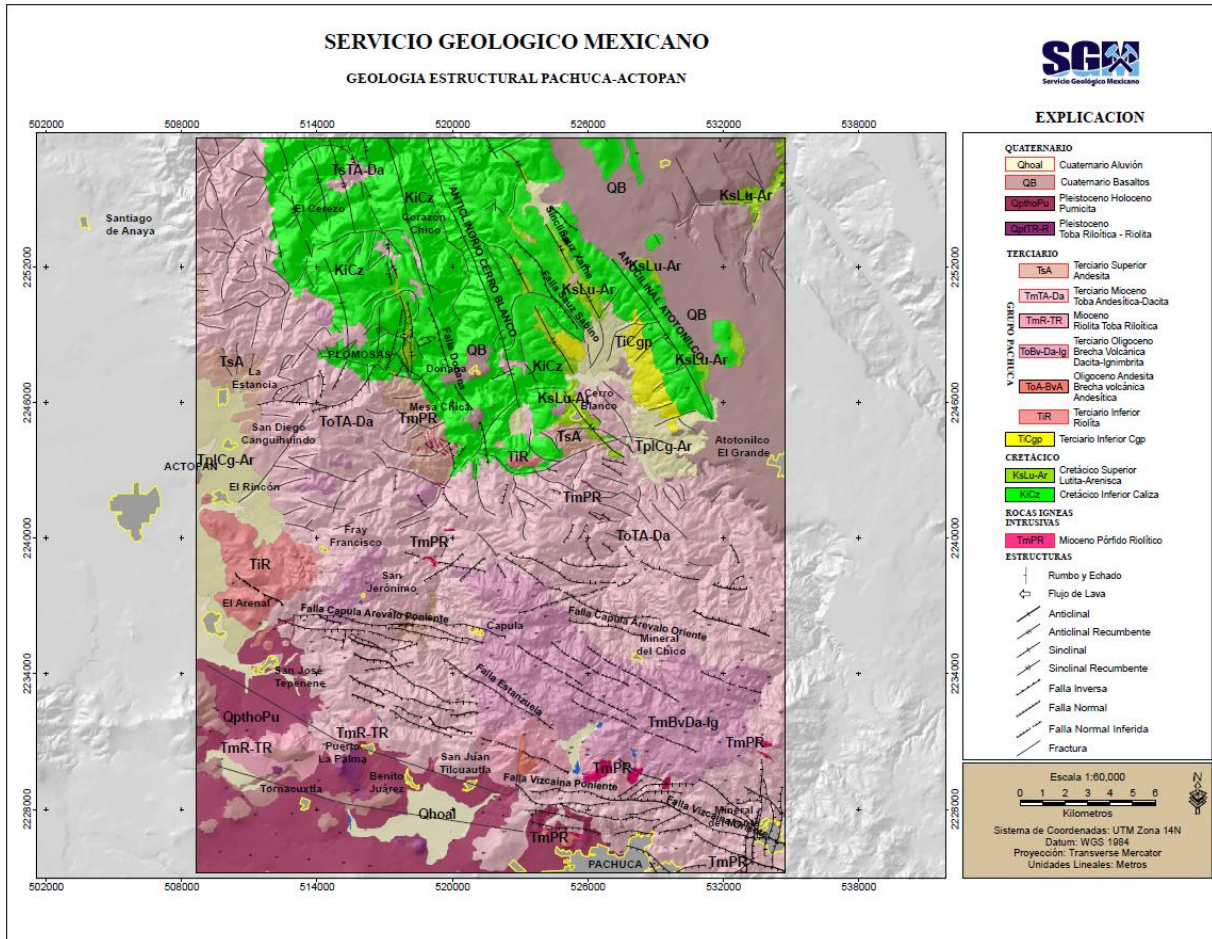


Fig. IA. Mapa geológico estructural Actopan-Pachuca.

Generación de metadatos para el sistema SIG.

Para un resguardo o consulta de la información generada en el presente proyecto, es necesario generar un metadato del mismo para su consulta o guía de los datos que se utilizó durante este desarrollo en una página web del SGM, a partir de un nodo de enlace a través de la empresa.

En el presente capítulo se define el concepto de metadatos, describiendo los elementos que conforman los estándares para metadatos geoespaciales elaborados por el Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC) de los Estados Unidos de América y se exploran los alcances de los metadatos como un medio para compartir los datos de una información.

La elaboración de metadatos permite mejorar el intercambio de información entre usuarios e instituciones y reducir costos por conceptos de duplicación de base de datos existentes y por lo tanto deben considerarse como un componente integral de un Sistema Integrado de Información Geográfica (SIIG). Los metadatos son un elemento dinámico que puede ser utilizado por la institución como un medio para mantener registros actualizados de los datos y a la vez facilitar la transferencia de archivos entre usuarios y clientes.

Qué son los metadatos.

En su forma más simple los metadatos es información sobre los datos que utilizamos o generamos en un Sistema de Información Geográfica. El contenido de los estándares para metadatos geoespaciales del Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC), fue diseñado para documentar los conjuntos de datos geoespaciales. De esta manera los usuarios pueden utilizar diferentes formatos para documentar sus metadatos, por ejemplo ESRI puede utilizar el documento.aml en el software Arcinfo, ArcCatalog en ArcGis 9.3. Para este proyecto fue utilizado este último para crear el metadato. Existen varios software que también son utilizados para generar estos mismos.

Estructura de los Metadatos.

Los estándares para determinar la documentación de la base de datos o la información plasmada en este proyecto, proveen una terminología común y un conjunto de definiciones para documentar los datos geoespaciales. El Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC)

de los Estados Unidos de América, recomienda y determina siete parámetros para cada base de datos como se muestra a continuación y en los diagramas de las Figuras (II.1, II.2).

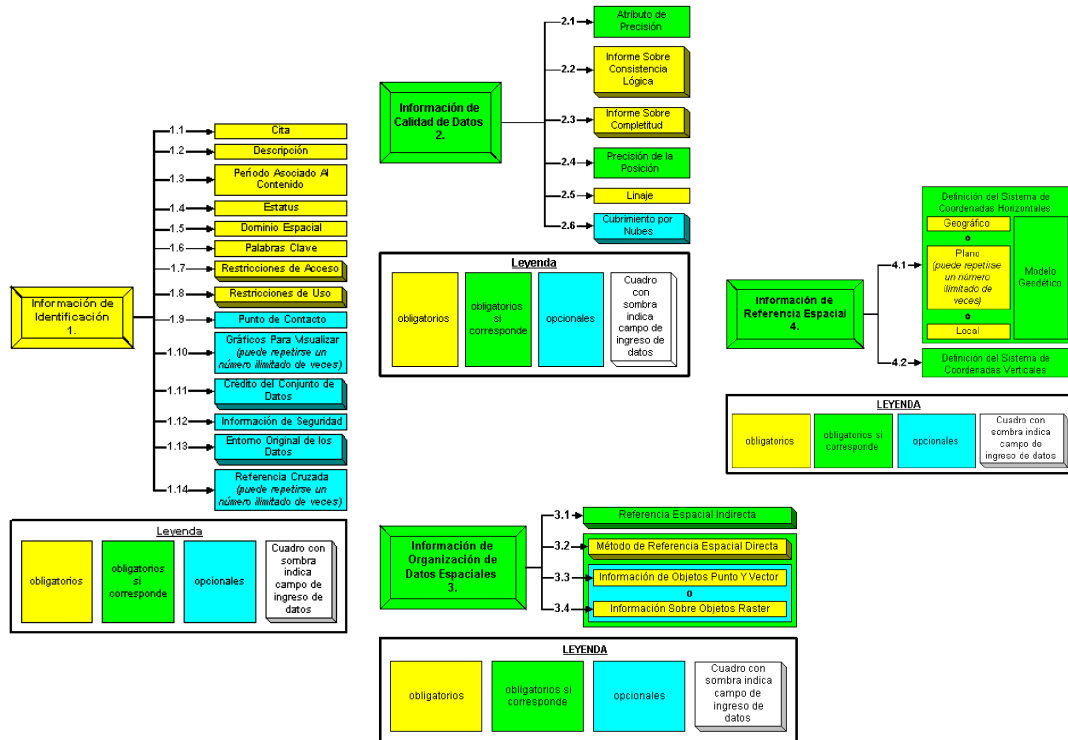


Fig. II.1. Estructura de un metadato, sección 1, 2, 3, 4, (Fuente USGS, 1998)

1. Información sobre la identificación de los datos. Incluye la información básica sobre el conjunto de datos.

2. Información sobre la calidad de los datos. Aquí se ofrece al usuario de los datos el resultado de las pruebas o procedimientos utilizados para evaluar la calidad de los datos.

3. Información de organización de datos geoespaciales. Se describe la estructura de datos utilizados para representar la información espacial en el conjunto de datos.

4. Información sobre el sistema de coordenadas utilizado (Referencia geoespacial). En este punto se debe brindar una descripción del marco de referencia y de los medios utilizados para codificar las coordenadas en el proyecto de datos.

5. Información sobre las entidades y sus atributos. Descripción del tipo de entidad utilizada así como de sus atributos.

6. Información sobre la distribución de los datos. Aquí se indica cómo obtener una copia del proyecto de los datos.

7. Información de referencia sobre los metadatos. Esta sección contiene información sobre diferentes aspectos de los metadatos tales como fecha, actualizaciones, seguridad, restricciones de uso y la persona responsable de ello.

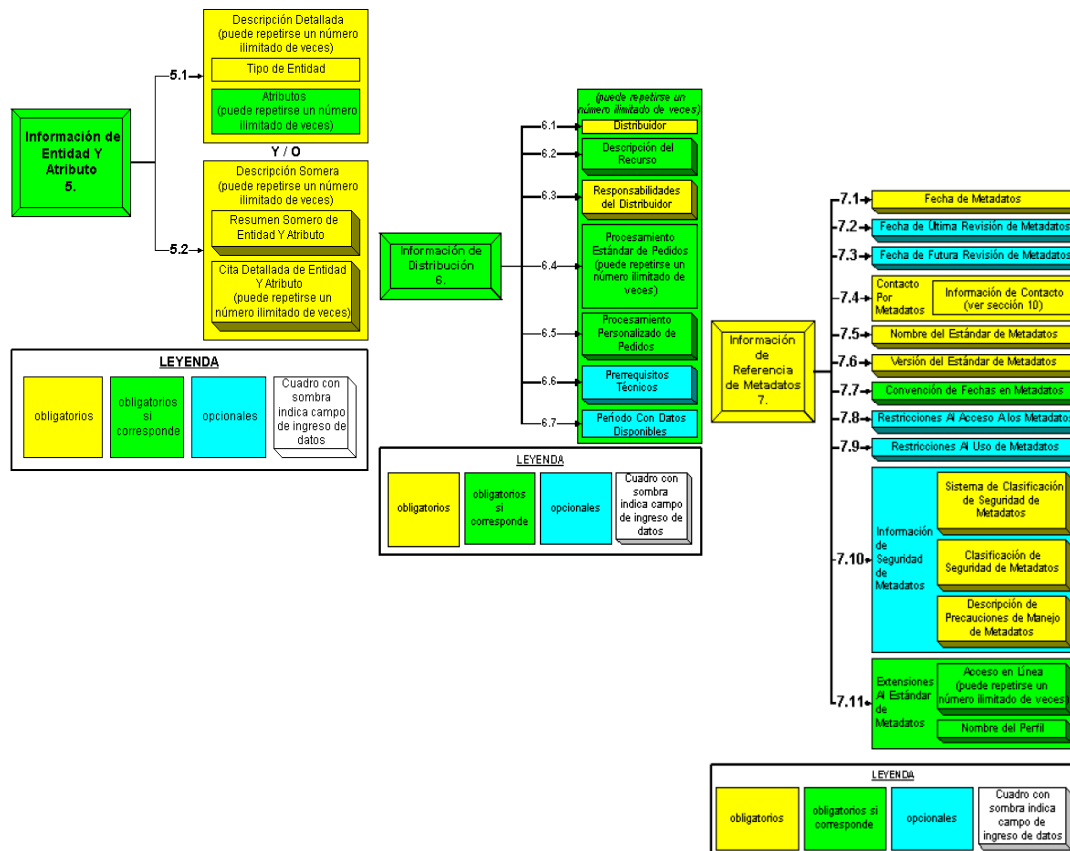


Fig. II.2. Continuación de la estructura de un metadato sección 5, 6, 7 (Fuente USGS, 1998).

Generación del metadato.

Para desarrollar el metadato de este proyecto se utilizó el software ArcGis 9.3 con una herramienta propia llamada ArcCatalog, utilizando la información recabada durante el proceso de este proyecto. Las partes del metadato de cada una de las secciones se especifican dentro de un parámetro de validación, para ser mostrado dentro de una página de internet, a partir de un nodo, regulado por una institución oficial y dar el modo de aprobación para su publicación y consulta.

Para este proceso el metadato debe cumplir con el estándar regido por la Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC) de los Estados Unidos de América. La validación del metadato se realiza con un software llamado Corpsmet95, que determina los errores de estructura o falta de información de acuerdo a las reglas del (FGDC).

La salida de archivos del metadato elaborado requiere de una triplete del metadato en formatos txt, sgml (Standardized Generalized Markup Language) y html (Hyper Text Markup Language), para ser levantado en un Centro Distribuidor de Metadatos.

Los archivos de salida son de la siguiente manera, una vez validados:

- Análisis Espacial Geológico Minero Actopan-Pachuca_Mexico.txt
- Análisis Espacial Geológico Minero Actopan-Pachuca_México.sgml
- Análisis Espacial Geológico Minero Actopan- Pachuca_México.html

La estructura final del metadato se muestra en la Fig. II.3., con la parte del índice de las siete secciones que debe llevar el archivo con cada una de sus características y a su vez se anexa en formato (HTML) de acuerdo a los estándares internacionales, el metadato final generado para este proyecto se podrá visualizar en un archivo adjunto.

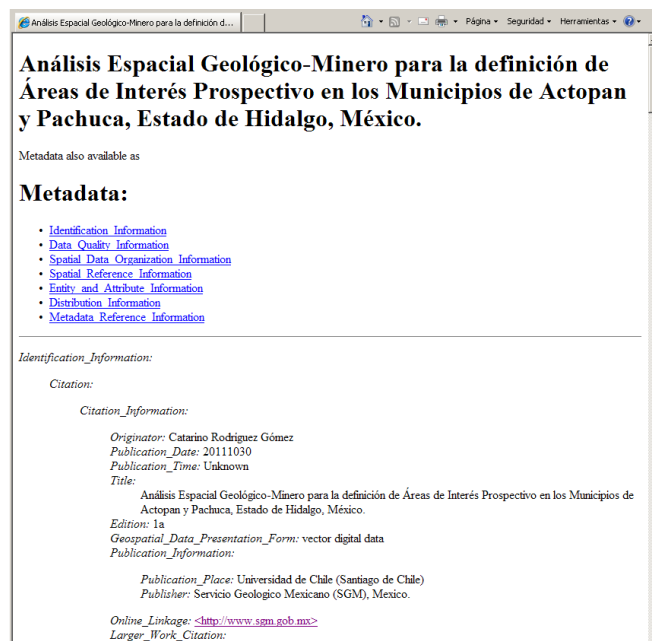


Fig. II.3. Estructura final del metadato mostrando las siete secciones.

Anexo III (CD adjunto)

Anexo III.1. Plano geológico estructural de la zona Actopan-Pachuca, escala 1:60.000 para impresión.

Anexo III.2. Resultado Muestreo Geoquímico Actopan

Anexo III.3. Resultado Muestreo Geoquímico Pachuca

Anexo III.4. Metadato final Análisis Espacial Geológico Minero Actopan-Pachuca Mexico