



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Geología estructural y mineralización
epitermal de la región de Actopan y
Santa Rosa, Sierra de Pachuca,
Estado de Hidalgo.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Sabrina Jacqueline Salvador Santamaría

DIRECTOR DE TESIS

Dr. en C.T. Edgar Ángeles Moreno



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

**Geología estructural y mineralización epitermal
de la región de Actopan y Santa Rosa, Sierra de
Pachuca, Estado de Hidalgo.**

SABRINA JACQUELINE SALVADOR SANTAMARÍA

DIRECTOR: DR. EDGAR ANGELES MORENO

SINODALES-REVISORES

ING. ALFREDO VICTORIA MORALES

M. C. EDITH FUENTES GUZMAN

M. I ISABEL DOMINGUEZ TREJO

ING. JULIETA MARES LÓPEZ

M. C. EMILIANO CAMPOS MADRIGAL

**Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Año 2020**

Agradecimientos

A Dios por todo lo bueno que me ha dado, por jamás abandonarme y ser la fuerza en mí. A mi madre por ser la mejor, por entenderme, por tu paciencia, por todo el esfuerzo que has puesto en mis hermanos y en mí. A mi papá Cruz por permitirnos tener un hogar, aunque ya no estemos en el mismo lugar sé que siempre nos acompañas y dónde estés sigues siendo el mejor padre que toda nuestra familia pudo tener.

A todos mis amigos por brindarme tanta alegría en cada etapa, en especial a Rebeca mi bff, vamos a cumplir nuestras metas, ya verás. A Claus porque vamos en el camino juntas, ojalá te hubiera conocido mucho antes, a Verito y Karencita por ser las niñas más listas y bonitas en todos los sentidos que pude conocer en la facultad. A todos esos amigos que han sido mis confidentes, pero especialmente a Alejandro Rodríguez y Alejandro Rosales, ¡espero que sigamos siendo buenos amigos siempre!

A la señora Leticia Rodea y su familia, por apoyarme en todos los sentidos, por ser como una madre para mí, por brindarme la confianza en todo momento, es usted una persona maravillosa.

A Pedro por brindarme todo el apoyo durante este tiempo, por estar en lo difícil y decidir seguir ahí, cuidándome y dando lo mejor de ti, por demostrarme que puedo aprender cosas nuevas, porque me siento feliz sabiendo que fuimos educados de la misma forma, en el amor a Dios, con principios y valores y porque juntos todo ha sido mejor.

Quiero manifestar un agradecimiento especial al Dr. Edgar Ángeles Moreno, por toda la paciencia, el conocimiento y la dedicación que tuvo para este trabajo, por el interés que demostró desde que me propuso el tema y hasta este momento, por llevarme a campo y enseñarme todo lo que pudo con la mejor disposición. También a Ruth y Noé mis queridos compañeros de campo, que trabajaron a mi lado dando lo mejor de sí mismos.

Al Ing. Alfredo Victoria, a la M. C. Edith Fuentes, a la Ing. Julieta Mares, al M. C. Emiliano Campos y la M. I Isabel Domínguez por sus valiosas revisiones que me ayudaron a concluir este trabajo y sobre todo por la comprensión y paciencia que han tenido conmigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la mejor educación que pude tener.

“Por mi raza hablará el espíritu”.

Resumen

La Sierra de Pachuca ubicada dentro de la Faja Volcánica Transmexicana contiene el distrito Minero de clase mundial como es Pachuca-Real del Monte. Muchos estudios se han realizado relacionados a las mineralizaciones, geología básica y exploración minera, sin embargo, estudios específicos y a escalas locales de geología estructural son escasos y más aún en el sector poniente de la Sierra de Pachuca en las cercanías de Actopan, San José Tepenené y Capula-Santa Rosa. La geología estructural en relación con la mineralización epitermal es de importancia para entender la distribución de alteraciones hidrotermales y la distribución de la mineralización en el distrito minero y hacen falta trabajos de esta índole. El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la geología estructural en relación con la mineralización epitermal de la zona de Actopan y Santa Rosa mediante la elaboración de cartografía geológico-estructural, geológico-minera y un análisis estructural, para averiguar si existieron posibles controles estructurales en la mineralización de las vetas epitermales. Las metodologías empleadas para lograr los objetivos y resolver el problema planteado, en este trabajo fueron: investigación documental, cartografía geológica y geológico-minera, geología de campo, geología estructural, análisis estructural e integración.

Los resultados de este trabajo muestran que la zona de estudio entre Actopan y Santa Rosa, parte poniente de la Sierra de Pachuca, contiene a la Formación Vizcaína que son una secuencia de derrames andesíticos con depósitos volcanoclásticos y a veces depósitos piroclásticos que varían de composición andesítica a dacítica. Esta formación fue intrusionada por domos y diques que varían de composición de riolítica a riodacítica y que en este trabajo se definió como unidad San José que es equivalente a la Formación Cerezo en Real del Monte. La Formación El Zumate es la unidad que aparece en niveles estratigráficos superiores que fue intrusionada por diques riolíticos de la unidad San José. Los domos y diques estuvieron ligados a la mineralización epitermal y se emplazaron un poco antes de que ocurriera esta y existe una relación espacial muy cercana. Las vetas de cuarzo con oro y plata y alteraciones epitermales como propilítica, clorítica, argilización y

silicificación fueron controladas por fracturas y fallas que ocurrieron en tres eventos de extensión (deformación) (E1, E2, E3). El evento E1 fue asociado a extensión N-S y NNE-SSW y que dictaminó la orientación de la Sierra de Pachuca y emplazamiento de las rocas volcánicas de la Formación Vizcaína con un correspondiente basculamiento de las capas. El evento E2 fue un evento que combinó movimiento lateral y fallamiento normal (transtensional) (extensiones E-W, NE-SW y NW-SE) y que estuvo implicado con el emplazamiento de criptodomas, domos y diques riodacíticos de la unidad San José y que después de este emplazamiento continuo el fallamiento y fracturamiento en donde los fluidos hidrotermales aprovecharon las zonas de permeabilidad para emplazarse en forma de vetas epitermales. El evento E3 es extensional N-S (post-mineral) y relacionado con la formación de las rocas basálticas de conos cineríticos pertenecientes al vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana.

Abstract

The Sierra de Pachuca is located in the Transmexican Volcanic Belt and contains the world-class mining district such as Pachuca-Real del Monte. Many studies have been carried out related to mineralization, basic geology and mining exploration. However, specific studies in local scales of structural geology are scarce and even more so in the western sector of the Pachuca mountain range near Actopan, San José Tepenené and Capula-Santa Rosa. Structural geology in relation to epithermal mineralization is important to understand the distribution of hydrothermal alterations and the distribution of mineralization in the mining district that works are needed. The main objective of this work was to characterize the structural geology in relation to the epithermal mineralization of the area of Actopan and Santa Rosa through the elaboration of geological-structural, geological-mining cartography and a structural analysis, to find out if there were possible structural controls in the mineralization of the epithermal veins. The methodologies used to achieve the objectives and solve the problem, several methodologies were used. The methodologies used in this work were: documentary research, geological and geological-mining cartography, field geology, structural geology, structural analysis and integration. The results of this work show that the study area between Actopan and Santa Rosa, a western part of the Sierra de Pachuca, contains the Vizcaína Formation that are a sequence of andesitic effusions with volcanoclastic deposits and sometimes pyroclastic deposits that vary in andesitic composition to dacitic. This formation was intruded by domes and dikes that vary from rhyolitic to riodacitic composition and which in this work was defined as a San José unit that is equivalent to the Cerezo Formation in Real del Monte. The El Zumate Formation is the unit that appears in higher stratigraphic levels that was intruded by rhyolitic dykes of the San José unit. The domes and dikes were linked to epithermal mineralization and were located a little before this occurred and there is a very close spatial relationship. The gold and silver quartz veins and epithermal alterations such as propylitic, chloritic, argillization and silicification were controlled by fractures and failures that occurred in three extension (deformation) events (E1, E2, E3). The E1 event was associated with the N-S and NNE-SSW extension and which ruled the orientation of the

Sierra de Pachuca and the location of the volcanic rocks of the Vizcaína Formation with a corresponding tilting of the layers. The E2 event was an event that combined lateral movement and normal (transtensional) failure (extensions EW, NE-SW and NW-SE) and was involved with the location of cryptodomes, domes and riodacitic dikes of the San José unit and later from this continuous location the failure and fracturing where the hydrothermal fluids took advantage of the permeability zones to be located in the form of epithermal veins. The E3 event is extensional N-S (post-mineral) and related to the formation of basaltic rocks of cineritic cones belonging to the volcanism of the Transmexican Volcanic Belt.

Contenido

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Agradecimientos</i> | <i>I</i> |
| <i>Resumen</i> | <i>II</i> |
| <i>Abstract</i> | <i>IV</i> |
| <i>Contenido</i> | <i>VI</i> |
| <i>Capítulo 1</i> | <i>1</i> |
| <i>Introducción</i> | <i>1</i> |
| 1.1 Planteamiento y justificación del problema | <i>1</i> |
| 1.2 Hipótesis | <i>2</i> |
| 1.3 Objetivos | <i>3</i> |
| 1.3.1 Objetivo general | <i>3</i> |
| 1.3.2 Objetivos específicos | <i>3</i> |
| 1.4 Localización del área de estudio | <i>4</i> |
| <i>Capítulo 2</i> | <i>5</i> |
| <i>Marco Teórico</i> | <i>5</i> |
| 2.1 Faja Volcánica Transmexicana | <i>5</i> |
| 2.2 Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM). | <i>7</i> |
| 2.3 Fallas importantes de la zona de estudio. | <i>12</i> |
| 2.4 Vetas | <i>13</i> |
| 2.5 Depósitos Epitermales de Intermedia y baja sulfuración | <i>14</i> |
| <i>Capítulo 3</i> | <i>15</i> |
| <i>Metodología</i> | <i>15</i> |
| 3.1 Investigación documental | <i>16</i> |
| 3.2 Cartografía geológica y geología de campo | <i>16</i> |
| 3.3 Geología estructural | <i>17</i> |
| 3.4 Análisis estructural | <i>17</i> |
| <i>Capítulo 4</i> | <i>18</i> |
| <i>Estratigrafía</i> | <i>18</i> |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Formación Vizcaína | 20 |
| 4.2 Unidad San José..... | 23 |
| 4.3 Formación Zumate | 25 |
| 4.4 Unidad Santa María..... | 27 |
| <i>Capítulo 5</i> | 29 |
| <i>Geología Estructural</i> | 29 |
| 5.1 Zona minera Santa Ana-Capula | 29 |
| 5.2 Zona minera Santa Rosa..... | 31 |
| 5.2.1 Fallas San Felipe | 31 |
| 5.2.2 Fallas y vetas-falla La Cruz | 32 |
| 5.2.3 Fallas y vetas-falla Santa Rosa | 32 |
| 5.3 Zona minera Santa Lucía-San José Tepenené | 33 |
| 5.3.1 Vetas-falla del área La Trinidad | 33 |
| 5.3.2 Vetas-falla del área Samaría | 34 |
| 5.3.3 Vetas-falla y fracturas enfrente de Los Frailes | 34 |
| 5.4 Zona minera Puerto del Oro-Ernestina | 36 |
| 5.4.1 Fallas NE-SW | 36 |
| 5.4.2 Fallas NW-SE | 36 |
| <i>Capítulo 6</i> | 37 |
| <i>Estructuras, texturas de mineralización y alteraciones hidrotermales</i> | 37 |
| 6.1 Estructuras de mineralización | 37 |
| 6.1.1 Tipos de vetas epitermales | 37 |
| 6.2 Alteraciones hidrotermales..... | 39 |
| 6.3 Clasificación de las alteraciones hidrotermales..... | 39 |
| 6.4 Alteraciones relacionadas a la actividad magmática somera | 40 |
| 6.5 Alteraciones hidrotermales en el área de estudio..... | 43 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Capítulo 7</i> | 45 |
| <i>Discusión: Análisis estructural (deformación)</i> | 45 |
| 7.1 Análisis de orientación de fallas y fracturas..... | 45 |
| 7.2 Análisis de Deformación..... | 49 |
| 7.3 Controles estructurales | 52 |
| 7.4 Modelo conceptual | 54 |
| <i>Conclusiones</i> | 56 |
| <i>Referencias</i> | 57 |
| <i>10. Anexos</i> | 61 |
| Anexo 1 Datos utilizados en estereogramas y rosetas (Fallas, vetas, fracturas y diques). | 61 |
| Anexo 2 Tablas de datos utilizados para el análisis en FaultKin | 71 |

Índice de figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Localización del área de estudio. | 4 |
| Figura 2.1 Ubicación Regional de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005). | 5 |
| Figura 2.2 Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM) (Modificada de Segerstrom, 1961; Geyne et al., 1963 en Camprubí, 2018). | 6 |
| Figura 2.3 Columna estratigráfica del distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (modificada de Geyne et al., 1963). | 11 |
| Figura 2.4 Esquema zoneamiento típico de alteración para los depósitos de baja e intermedia sulfuración (modificado de Buchanan, 1981 tomado de González Pena, 2010). | 14 |
| Figura 3.1 Esquema metodológico del trabajo desarrollado. | 15 |
| Figura 4.1 Mapa geológico estructural del área de San José Tepenené y Santa Rosa..... | 18 |
| Figura 4.2 Columna estratigráfica esquemática del área de estudio..... | 19 |
| Figura 4.3 Afloramientos de la Formación Vizcaína en el área de Actopan, San José Tepenené y Santa Rosa. A, Unidades de derrames andesíticos separados por superficies de enfriamiento, se encuentran basculadas hacia el Norte y afectadas por fallas normales, área de La Trinidad. B, Flujos de andesitas con abundantes autoclastos andesíticos porfídicos, área de Capula-Arévalo. C, capas de depósitos piroclásticos andesíticos con variación textural y tamaño de grano. D, andesitas con alteración propilítica afectados por fallas con alteración argílica. E, diques y diquestratos andesíticos con textura afanítica afectan a andesitas. F, brechas volcánicas andesíticas intercaladas con derrames lávicos andesíticos. | 22 |
| Figura 4.4 Afloramientos con estructuras magmáticas de la unidad San José. A, Domo riódacítico entre las Peñas Los Frailes y San José Tepenené, corta a andesitas de la Formación Vizcaína. B, foliación de flujo y pliegues de flujo en dique riódacítico enfrente de las Peñas Los Frailes. C, pliegues de flujo en dique riolítico a lo largo del camino San José Tepenené a San Jerónimo. D, diques riolíticos que cortan a andesita de la Formación Vizcaína, en área minera de Santa Lucía-San José Tepenené. E, acercamiento de contacto dique riolítico con andesita del punto D. F, pliegues de flujo en riolitas en domo riolítico en Puerto del Oro. | 24 |
| Figura 4.5 Afloramientos de la Formación Zumate en el área de estudio. A y B Afloramiento de la formación Zumate donde se observa los flujos lávicos en capas casi horizontales. C, Diques riódacíticos de la unidad San José intrusionan a la parte basal piroclástica de la Formación El Zumate. | 26 |
| Figura 4.6 Afloramientos de la unidad Santa María. A, vista al Sur desde las peñas Los Frailes, se observa discordancia entre la unidad Santa María y rocas volcánicas del Grupo Pachuca. B, cono piroclástico con depósitos de escoria basáltica y piroclásticos, conos cineríticos entre San Juan Solís y Santa María. | 27 |
| Figura 5.1 Mapa geológico-estructural del área de estudio..... | 30 |
| Figura 5.2 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Ana - Capula a partir de 3 datos, ver tabla A1 en anexo..... | 31 |
| Figura 5.3 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Rosa a partir de 68 datos, ver tabla A2 en anexos. | 33 |

Figura 5.4 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Lucía - San José Tepenené obtenidos a partir de 48 datos (datos estructurales en tabla A3 en los anexos).34

Figura 5.5 Estrías en los afloramientos de rocas ígneas ácidas con alteración argílica y limonitas cercanos a las peñas de Los Frailes.35

Figura 5.6 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera Puerto del Oro- Ernestina obtenidos a partir de 78 datos (datos numéricos en anexos en tabla A4).36

Figura 6.1. Tipos de estructuras en vetas epitermales en el área de estudio. A, rebaje de la veta Trinidad. B, rebaje de la veta La Cruz. C, vetas ramaleadas con texturas de cuarzo drúsico y estructura brechada en socavón La Cruz. D y E, veta de cuarzo drúsico y coloforme con limonitas indígenas encajonada en andesitas fracturadas, área de Santa Rosa. F, veta de cuarzo con estructura brechada y fracturada con jarosita y arcillas blancas de alteración; socavón de la obra La Esmeralda.38

Figura 6.2- Modelo de Lowell y Guilbert (1970) para el depósito de San Manuel-Kalamazoo, Arizona, mostrando el zoneamiento vertical y lateral de la alteración y la mineralización típico de los pórfidos de cobre.40

Figura 6.3- Sección esquemática de los patrones de alteración en sistemas de epitermales de baja sulfuración, (modificado de Hedenquist et al., 2000).41

Figura 6.4. Tipos de alteraciones hidrotermales en el área de estudio. A, andesita silicificada al alto de la veta falla Capula-Arévalo con vetillas-fractura con jarosita y cuarzo. B, vetillas fractura con jarosita (pirita) y goethita supergénica. C, alteración argílica con sericita y vetillas de jarosita (derivada de pirita) en la veta-falla Reforma con dique riolítico. D, veta Reforma con alteración argílica y limonitas supergénicas. E, vetillas en stockwork de jarosita con texturas de lisigan de las limonitas en riodacítica con alteración argílica, en el área de la veta La Cruz. F, fallas y fracturas con alteración argílica con limonitas rodeadas de roca andesítica con alteración propilítica.44

Figura 7.1 Estereogramas y rosetas de las fallas mapeadas en la zona de estudio. A, Zona minera de Santa Ana - Capula. B, Zona minera Santa Rosa. C, Zona minera de Santa Lucía – San José Tepenené. D, Zona minera Ernestina – Puerto del Oro.47

Figura 7.2 Estereogramas y rosetas de las fracturas mapeadas en la zona de estudio. A, Zona minera de Santa Ana - Capula. B, Zona minera Santa Rosa. C, Zona minera de Santa Lucía – San José Tepenené. D, Zona minera Ernestina – Puerto del Oro.48

Figura 7.3 Estereograma de deformación para la Zona minera de Santa Rosa.49

Figura 7.4 Estereograma de fallas que muestra direcciones de extensión principal para las fallas de la zona de Santa Lucía-San José Tepenené.50

Figura 7.5 Estereograma de fallas que muestra direcciones de extensión principal para las fallas de la zona mineralizada Ernestina-Puerto del Oro.51

Figura 7.6 Esquema que muestra las relaciones entre los eventos de extensión, la mineralización y la formación de unidades geológicas para el área de estudio.54

Figura 7.7 Esquema que muestra un modelo conceptual propuesto para la integración de litología, domos ígneos, mineralización y estructuras de deformación para el área de estudio.55

Índice de tablas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Zona minera Santa Ana-Capula</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla A1. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla B1. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla C1. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula.</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla D1. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula ..</i> | <i>62</i> |
| <i>Zona Minera de Santa Lucía - San José Tepeñené</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla A2. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla B2. Datos de veta para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla C2. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla D2. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Zona minera Santa Rosa</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla A3. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla B3. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Tabla C3. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa (continúa en la siguiente página).....</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla C3. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa (continuación).....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla D3. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Zona minera Ernestina – Puerto del Oro.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla A4. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla B4. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla C4. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla D4. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro</i> | <i>70</i> |
| <i>Zona Minera de Santa Rosa</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla A5. Datos de Fallas de la Zona Minera de Santa Rosa utilizados para el análisis en FaultKin. ..</i> | <i>71</i> |
| <i>Zona Minera Santa Lucía – San José Tepeñené</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla A6. Datos de Fallas de la Zona Minera Santa Lucía – San José Tepeñené utilizados para el análisis en FaultKin.</i> | <i>72</i> |
| <i>Zona Minera de Ernestina Puerto del oro</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla A7. Datos de Fallas de Zona Minera de Ernestina Puerto del oro utilizados para el análisis en FaultKin.</i> | <i>73</i> |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento y justificación del problema

La geología estructural es la rama de la Geología que estudia y caracteriza mediante mediciones y descripciones a las estructuras de masas rocosas en la corteza terrestre, esta disciplina es una herramienta que lleva a la comprensión de la disposición de estas estructuras en una región y de la historia de su desarrollo geológico. Para la geología minera la geología estructural aplicada a la minería es de gran ayuda pues existen acumulaciones minerales que dependen de la geometría y de la permeabilidad de las estructuras de deformación (fracturas, fallas, foliaciones, pliegues, etc.); con una cartografía geológico-estructural con enfoque minero y un análisis estructural adecuado se puede convertir este conocimiento en guías de exploración importantes de mineralización económica y a su vez el conocimiento estructural es útil para integrarse a un modelo de yacimiento que se usa en varias etapas de la exploración y la explotación.

El Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM) es un distrito de clase mundial y está formado de vetas epitermales de intermedia a baja sulfuración encajonadas en rocas volcánicas (Geyne *et al.*, 1963). El distrito minero de Pachuca-Real del monte se encuentra dentro de la sierra de Pachuca que es un centro volcánico del Cenozoico y ubicado dentro de la Faja Volcánica Transmexicana. Muchos estudios se han realizado relacionados a las mineralizaciones, geología básica y exploración minera (Valverde-Ramírez *et al.*, 1977; Orozco-Sánchez, 1979; De León-Chávez, 1982; González-Gallardo *et al.*, 1987; García-Castro, 1987; García-Castro *et al.*, 1988, 1988(a), 1988(b); Dueñas-García, 1989; De los Santos-Montaño, J., 1996), sin embargo, estudios específicos y a escalas locales de geología estructural son escasos y más aún en el sector poniente de la sierra de Pachuca en las cercanías de Actopan, San José Tepenené y Capula-Santa Rosa. Otros estudios recientes que se han desarrollado han sido de carácter geográfico y regional como la aplicación de Sistemas de Información Geográfica a la sierra de Pachuca (Rodríguez-

Gómez, 2012) y no geológico-estructurales que sean de carácter semidetallado y con trabajo de campo.

Los depósitos minerales del distrito minero de Pachuca-Real del Monte son de origen epigenético, ocurrieron como rellenos de fisuras, formados ampliamente como incrustaciones sobre las paredes de cavidades abiertas y sólo sobre una menor escala las vetas minerales remplazaron la pared de roca y los minerales formados en una etapa temprana. El reemplazamiento afectó principalmente los fragmentos de roca atrapados o incluidos en las fisuras por movimiento de las paredes. El ensamblaje de cuarzo, bustamita o rodonita, calcita, pirita, esfalerita, galena, calcopirita y sulfuros de plata con plata y oro nativo, representan los principales rellenos de vetas, (Geyne, *et al.*, 1963).

Debido a que la mineralización en la sierra de Pachuca es de tipo epitermal, el estudio de la geología estructural puede mostrar posibles “trayectorias” por las que ocurrió el tránsito de los fluidos y que dieron lugar a las mineralizaciones, lo que significa que posiblemente algunos de los clavos de mineral del DM-PRM tengan un control estructural.

Este trabajo de investigación busca la caracterización geológico-estructural y sus relaciones con la mineralización de las vetas epitermales de las zonas mineras de Actopan y Santa Rosa, que están localizadas en el extremo poniente de la sierra de Pachuca, y que la zona de estudio comprende parte de los municipios de El Arenal, Actopan y Mineral del Chico.

1.2 Hipótesis

Las estructuras mineralizadas (vetas y vetas-falla) de la región minera de Actopan, San José Tepenené y Santa Rosa fueron controladas estructuralmente por fallas y fracturas y siguieron patrones geométricos regulares.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar la geología estructural en relación con la mineralización epitermal de la zona de Actopan y Santa Rosa mediante la elaboración de cartografía geológico-estructural, geológico-minera y un análisis estructural, para averiguar si existieron posibles controles estructurales en la mineralización de las vetas epitermales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar cartografía geológica estructural y geológico-minera mediante trabajo de campo para establecer relaciones estructurales con alteraciones hidrotermales y vetas epitermales.
- Integrar algunos datos geológico-mineros levantados por el Consejo de Recursos Minerales (hoy SGM) en los años setenta, ochenta y noventa para tener una cartografía geológico-minera más completa.
- Realizar un análisis estructural a partir de relaciones de corte en campo y datos de gabinete de las estructuras de mineralización y de deformación.
- Determinar posibles guías estructurales en la mineralización mediante la integración del resultado del análisis estructural con el trabajo de campo para proponer un posible modelo conceptual de control estructural en la mineralización.

1.4 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en el extremo poniente de la sierra de Pachuca dentro del estado de Hidalgo, abarca partes de los municipios de El Arenal y Mineral del Chico (figura 1.1). El área tiene coordenadas UTM-WGS84 extremas y en cada esquina: 512,500 mE; 2237,000mN y 518, 500 mE, 2230,000mN. El área cubre una superficie de 42 km².

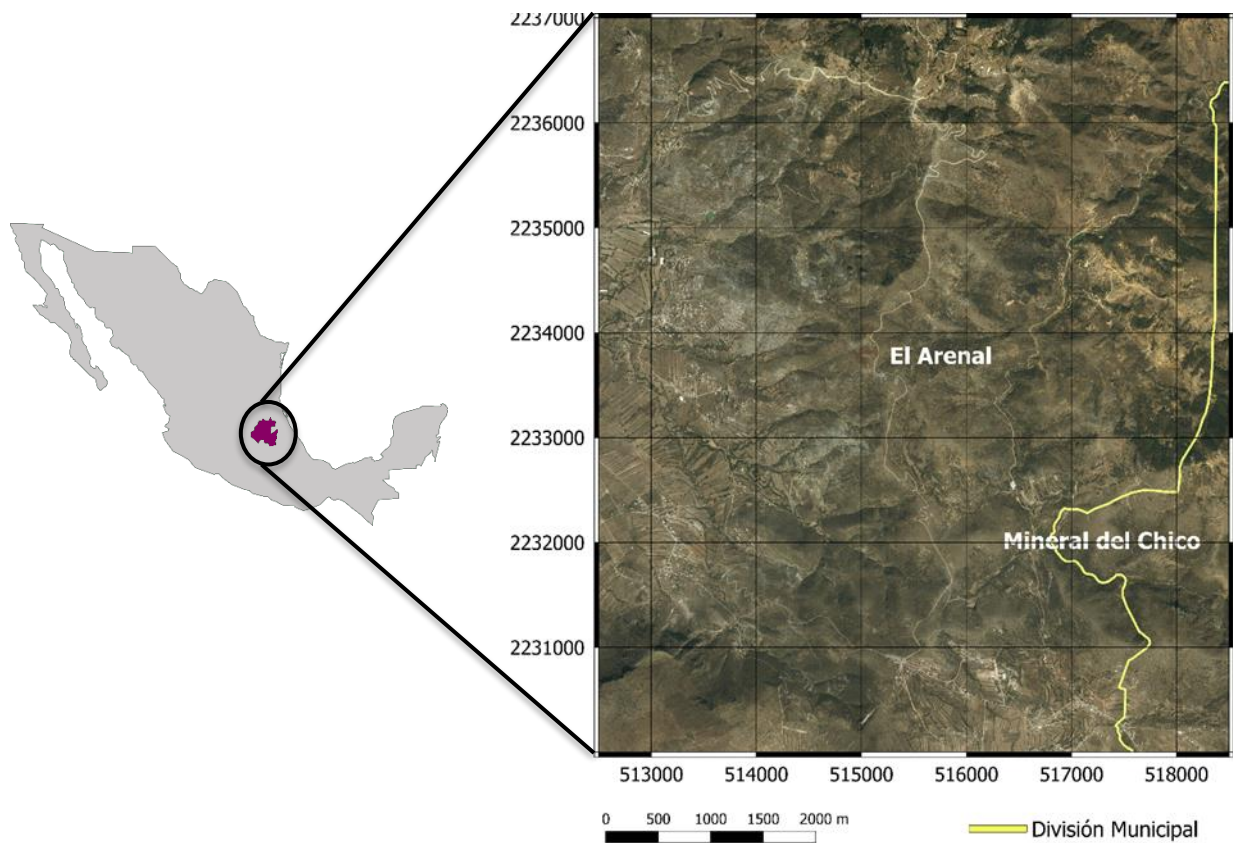


Figura 1.1 Localización del área de estudio.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica, se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco, se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental, que presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química (Ferrari, 2000), figura 2.1.

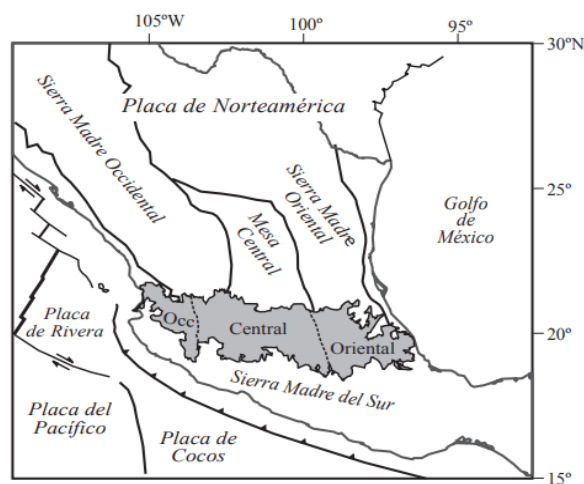


Figura 2.1 Ubicación Regional de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005).

La Sierra de Pachuca se encuentra en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), al oriente del sistema de fallas Taxco-Querétaro, Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende, (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez et al., 2002). En la parte oriente de la FVTM gran parte del volcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales, mientras que los volcanes monogenéticos de composición basáltica representan sólo una pequeña fracción del volumen de magma emplazado (Gómez-Tuena et al., 2005).

En este sector el arco volcánico se emplaza sobre una corteza de edad precámbrica presumiblemente de tipo cratónico (Oaxaquia, Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1996).

La Sierra de Pachuca (figura 2.2) que contiene al Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM) en el contexto de la FVTM, implicaría que las rocas volcánicas que componen la Sierra de Pachuca son rocas volcánicas antiguas (paleo-Faja?) del Mioceno medio y tardío (Gómez-Tuena *et al.*, 2005), sin embargo aún queda abierta la posibilidad de interpretar sus edades, ya que no hay muchos fechamientos de sus rocas volcánicas y los que existen no se han realizado con recientes técnicas radiométricas.

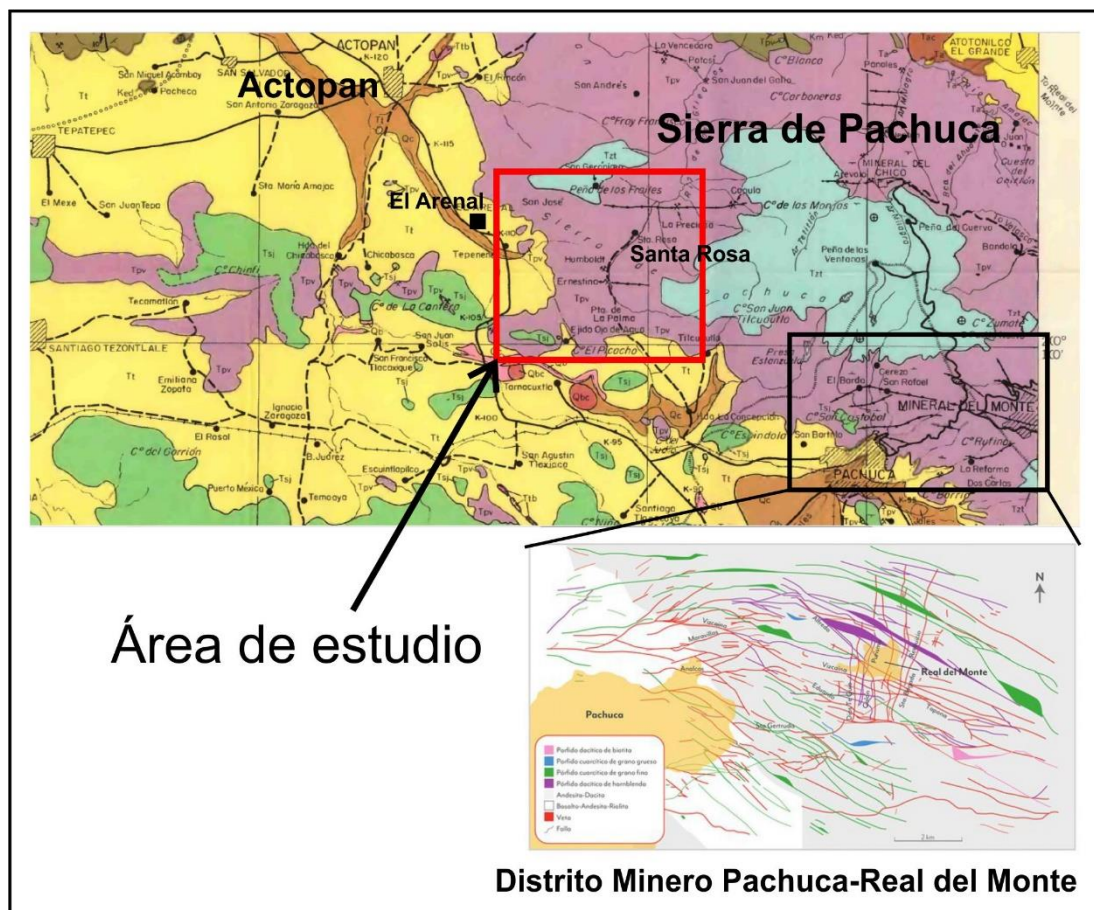


Figura 2.2 Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM) (Modificada de Segerstrom, 1961; Geyne *et al.*, 1963 en Camprubí, 2018).

2.2 Distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (DM-PRM).

El Distrito Minero de Pachuca-Real del monte (DM-PRM) se encuentra dentro del estado de Hidalgo, que a su vez está situado en la porción de centro-sur de la República Mexicana, colinda al norte con el estado de San Luis Potosí, al sur con los estados de México y Tlaxcala, al este con los estados de Veracruz y Puebla y al oeste con el estado de Querétaro.

El DM-PRM cubre una superficie de 130 km² (Salinas-Hernández, en Oviedo-Gómez y Hernández-Badillo, 2012) fue descubierto en 1522 y que de acuerdo con Río-Torres (2009) ha producido hasta la fecha más de 100 millones de toneladas que contienen 1300 millones de onzas de plata y 7.5 millones de onzas de oro. Las obras mineras del distrito en longitud alcanzan cerca de 3000 km. Estudios importantes del distrito minero son los trabajos de Bastin (1948), Wisser (1951), Thornburg (1952) y Geyne *et al.*, (1963).

De acuerdo con Río-Torres (2009) y que está basado en trabajo de Geyne *et al.* (1963) el distrito minero pasó por varias etapas históricas de actividad minera:

Los primeros 200 años después de la conquista destaca el uso del método de patio por los españoles para el beneficio del mineral que desarrolló Bartolomé de Medina en 1555 en Pachuca. Entre 1738 hasta 1810 Don José Alejandro Bustamante y Bustillo propuso la explotación de todas las minas abandonadas a lo largo de la veta Vizcaína mediante la construcción de un socavón de drenaje de 2400 m de longitud que fue denominado socavón del Morán.

Entre 1824 a 1849 compañías inglesas llegaron al distrito atraídos por su riqueza y producen modernos sistemas de explotación con la mecanización de las minas al instalar bombas y malacates movidos por el vapor.

De 1849 a 1906 la Sociedad Aviadora de Minas de Real del Monte y Pachuca formada por mexicanos continúa con la explotación de las minas.

De 1906 a 1947 la *United States and Refining Company* de los E.U.A. explota minas en la parte sur del distrito.

De 1947 a 1990 con la adquisición de las acciones de nacional financiera, la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V. se convierte en la primera empresa paraestatal de México. En 1990 la compañía se desincorpora del sector público pasando a sector privado.

Desde 2006 a la fecha se continuó con la exploración de los sectores norte y noroeste del distrito, pero en un *joint venture* entre la compañía Solitario Resources y la empresa *Newmont Mining*, mientras que la Compañía de Real del Monte y Pachuca continúa con trabajos en los fundos principales del distrito y trabajos de beneficio de mineral en la planta de Loreto en la ciudad de Pachuca. Existen pequeños mineros que aún continúan trabajando en la parte interna y norte del distrito.

En el DM-PRM a grandes rasgos afloran cuatro paquetes litológicos, que de la base a la cima están constituidos por un conglomerado epicontinental; un paquete volcánico andesítico; un paquete volcánico riolítico; y un paquete volcánico basáltico. Sólo se observa el conglomerado epicontinental en el límite septentrional del distrito, (Simons y Mapes, 1957; Fries, 1960 en Azpeitia, 2007).

- Conglomerado epicontinental; conocido como Fanglomerado El Morro, descrito por Simons y Mapes (1957). Consiste en un conglomerado fluvio-lacustre que se interdigita con algunos niveles volcánicos (Azpeitia, 2007). Constituido por fragmentos de caliza, marga, lutita, pedernal y en menor proporción andesíticos, emplazados en una matriz arenosa oxidada (Azpeitia, 2007). Este fanglomerado tiene sus equivalentes en el centro y sur de México; Conglomerados de Guanajuato (Edwards, 1955), Balsas de los

estados de Morelos y Guerrero (Fries, 1960) y Rojo de Zacatecas (Azpeitia, 2007). Estas rocas se depositaron desde el Paleoceno hasta el Oligoceno (Azpeitia, 2007).

- La unidad volcánica andesítica yace concordantemente sobre el Fanglomerado El Morro y discordante sobre las formaciones Tamaulipas y Soyatal (Simons y Mapes, 1957 en Azpeitia, 2007). Su afloramiento es muy amplio en este distrito. Está constituida por una secuencia de lava masiva de textura afanítica a porfídica su composición va de andesita basáltica a riolacita, con interestratificación de toba y brecha de derrame con horizontes mal consolidados en la base y cuerpos andesítico-latíticos en forma de diques. Estas rocas han sido caracterizadas como de afinidad calcoalcalina (Geyne *et al.*, 1963; JICA, 1980 en Azpeitia, 2007).

Estas rocas son importantes por contener la mineralización en forma de estructuras tabulares (vetas). Representan parte del evento hidrotermal terciario que se desarrolló en la región central de México. Por correlación con el distrito de Zimapán se le asigna una edad correspondiente al Oligoceno, 38 a 27 Ma (JICA, 1980 en Azpeitia, 2007).

- La unidad volcánica riolítica está poco expuesta en el distrito, siendo representada por ignimbritas y riolita masiva, con algunos horizontes de brecha. En los alrededores de Zimapán, se le ha asignado una edad de 26 a 27 Ma (JICA, 1980), que corresponde a la parte tardía del Oligoceno (Azpeitia, 2007). Desde el punto de vista metalogénico, la riolita contiene mineralización de elementos preciosos bajos en sulfuros en este distrito (JICA, 1980 en Azpeitia, 2007).

- La unidad volcánica basáltica está constituida por derrames y diques de carácter calcoalcalino con pequeñas intercalaciones de niveles riolíticos, de edad plio- cuaternaria, típicos de la Faja Volcánica Transmexicana. Los depósitos basálticos son comunes hacia la porción central del estado, donde las lavas se intercalan con depósitos fluvio-lacustres o coronan a éstos (Azpeitia, 2007).

De acuerdo con el trabajo de Geyne *et al.* (1963) la columna estratigráfica del distrito minero alcanza un espesor medido de cerca 2600 m, y la columna estratigráfica se muestra en la figura 2.3. Esta columna volcánica es considerada con un rango de edades del Oligoceno al Plioceno tardío por Geyne *et al.*, (1963) cuyo basamento son rocas sedimentarias de origen marino de edad Cretácica y que están plegadas y con presencia de fallas inversas, estructuras de deformación de la orogenia Laramide (Azpeitia, 2007).

De acuerdo con Geyne *et al.*, (1963) la secuencia volcánica cenozoica se compone de diez formaciones geológicas desde la base a la cima de la columna: Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo, Tezuantla, Zumate y San Cristóbal. Los tipos de rocas de estas formaciones varían desde basaltos, riolitas, dacitas y andesitas. Las unidades son separadas por discontinuidades erosionales y algunas discontinuidades angulares.

Una edad en comunicación personal obtenida por Clark, 1986 en Río-Torres (2009) es de un intervalo de 23.7 a 21.6 Ma, edad de K-Ar probablemente de roca total en rocas de la secuencia Santa Gertrudis-Zumate. Y existe otra edad K-Ar de roca total de una andesita con alteración hidrotermal de 20.3 ± 0.5 Ma (McKee *et al.*, 1992 en Río-Torres, 2009).

| EDAD | UNIDAD LITOLÓGICA | LÍMITES DE ESPESOR | COLUMNA LITOLÓGICA | DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pleistoceno y reciente | Taludes y derrumbes (0-30) Corrientes, brecha y toba de basalto olivínico (0-500) | 0-500 +m | | Taludes y derrumbes - Mezcla inequigranular de bloques angulosos con materiales de grano más fino y con suelo. Toba Cubitos - Ceniza basáltica ligeramente endurecida, porosa y equigranular, con capas basales locales de limo y pómez de color gris claro. Corrientes, brecha y toba de basalto olivínico - Principalmente corrientes y ceniza, con poca brecha, predominantemente de composición basáltica. Aluvión - Suelo, limo, arcilla, arena y grava, masivas a bien estratificadas y parcialmente cementadas por caliche y óxidos de hierro hidratados. Traquita Guajolote - Principalmente corrientes con poca ceniza y brecha, de composición traquita. Todos están interestratificados localmente entre sí, o se traslapan en edad. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| Plioceno | Formación San Cristóbal (0-250) | 0-500 + | | Formación San Cristóbal - Corrientes de andesita y basalto olivínicos, con cantidades menores de brecha y toba; principalmente de textura densa, aunque las partes superior e inferior de las corrientes están vesiculares; localmente aparece una capa tobácea basal de 1-2 m de espesor. Riolita Navajas - Principalmente corrientes pero se incluyen localmente estratos de toba y brecha piroclásticas originadas por aludes ardientes. Formaciones Atonónico El Grande y Tarango - Depósitos aluviales ligeramente cementados, masivos a bien estratificados, incluyendo localmente capas margosas, tobáceas y carbonosas; presentes en las áreas de desague del Río Metztlitlán y la cuenca de México, respectivamente. Todos están interestratificados entre sí o se traslapan en edad. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| | Formación Zumate | 0-360 + | | Corrientes y brecha de escurrimiento de composición principalmente andesítica y en parte dacítica, con textura porfídica variable de gruesa a mediana y estructura que varía de masiva a bien foliada; contiene algunos interestratos de material tobáceo y lahárico; las capas basales tobáceas y detritos volcánicos más gruesos miden hasta 120 m de espesor total. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| | Formación Tezuantla | 0-150 | | Corrientes riolíticas y riodacíticas, con textura medianamente porfídica y estructura fuertemente foliada. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| | Formación Cerezo | 0-220 | | Corrientes y brecha de escurrimiento riolíticas y riodacíticas, con textura medianamente porfídica y localmente esferulítica; estructura fuertemente foliada; las capas basales tobáceas tienen hasta 10 m de espesor; aparecen en la parte suroriental del distrito rocas volcánicas estratificadas epiclásticas de edad equivalente y con hasta 100 m de espesor. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| | Formación Vízcaina | 0-600 | | Corrientes lávicas y menor cantidad de brecha de escurrimiento de composición andesítica y dacítica, con textura fuertemente porfídica y estructura variable de fuerte a moderadamente foliada, con arrugamientos intensos locales; amígdalas aparecen localmente en la parte inferior; capas basales prominentes de arenisca y brecha tobáceas varían en espesor hasta 40 m en total; lentes tobáceas más delgadas aparecen localmente en horizontes superiores. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| Mioceno | Formación Santa Gertrudis | 0-350 | | Corrientes lávicas y pequeñas cantidades de brecha de escurrimiento de composición andesítica y dacítica, con textura fuertemente porfídica y estructura variable de masiva a ligeramente foliada; abundantes inclusiones caracterizan las corrientes; capas tobáceas basales son discontinuas y varían en espesor hasta un máximo de varios metros. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| | Formación Santa Real del Monte | 0-350 | | Brecha de escurrimiento y menor cantidad de corrientes lávicas sólidas de composición andesítica y dacítica, con textura de variable de fuerte a medianamente porfídica y estructura ligeramente foliada; capas tobáceas basales tienen hasta 5 m de espesor; lentes de arenisca y brechas tobáceas y de conglomerado volcánico se presentan en horizontes superiores. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| | Formación Pachuca | 110-620 | | Corrientes lávicas y brecha de escurrimiento en capas alternadas de composición principalmente andesítica y en parte dacítica, con textura variable de fina a medianamente porfídica y estructura que varía de masiva a moderadamente foliada; capas basales de arenisca y brechas tobáceas varían en espesor hasta un máximo a 20 m; capas margosas fosilíferas se presentan cerca de la base de la formación a lo largo del Río Amajac a una distancia de 8 km al norte del distrito de Pachuca. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| Oligoceno | Formación Corteza | 50-300 | | Corrientes andesíticas, con textura variable de no porfídica a finamente porfídica y parcialmente amigdaloides, con estructura ligeramente foliada; capas basales de arenisca y brecha, tobáceas tienen hasta 20 m de espesor máximo. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| | Formación Santiago | 480 + | | Corrientes lávicas de composición principalmente riolítica y dacítica y en parte andesítica, con textura moderadamente porfídica y estructura fuertemente foliada, inclusive una ondulación fluidal amplia; fuertemente esferulítica en la parte superior de la formación; localmente contienen lentes tobáceas y brechoides intercaladas de la misma composición; la base de la formación no está expuesta en el distrito minero, pero se presume que la unidad yace encima del Grupo El Morro o de rocas más antiguas. |
| DISCORDANCIA ANGULAR | | | | |
| Eoceno | Grupo El Morro | 0-200 | | Principalmente conglomerado no marino compuesto por fragmentos erosionados de caliza y dolomita con menores cantidades de rocas clásticas del Cretácico Superior; localmente contiene capas de limo, arena y arcilla, así como capas tobáceas, material volcánico detrítico y aun corrientes lávicas; notablenete de color rojizo, pero localmente parduzco. |
| | DISCORDANCIA ANGULAR | | | |
| Cretácico tardío | Formación Mexcalá - Méndez | 0-500 + | | Arenisca, limolita y lutita marinas de color gris, en capas variables de delgadas a medianas, que se convierten en colores amarillentos y parduzcos a la intemperie; se incluyen cantidades menores de conglomerado de grano fino en la parte superior de la formación y de capas altamente calcáreas en la parte inferior; las capas más inferiores localmente consisten en caliza arcillosa en capas delgadas, llamada Formación Soyatal, o bien en caliza casi pura en capas gruesas, llamada Formación Cuautla; su edad varía del Turoniano tardío, localmente, quizás hasta el Maestrichtiano temprano (Cretácico Tardío); fuertemente plegada y profundamente erosionada antes de que se depositaran las primeras rocas no marinas del Terciario. |
| | DISCORDANCIA EROSIONAL | | | |
| Cretácico temprano | Formación El Doctor | 100-1000 + | | Caliza marina variable de gris claro a gris oscuro en capas que varían de delgadas a gruesas; compuestas principalmente de calcarenita de grano fino con cantidades menores de calcilutita y aún menores de calcirrudita; algunas capas están parcialmente o totalmente dolomitizadas, en la parte superior de la formación son abundantes los foraminíferos grandes de la familia Miliolidae, junto numerosos gasterópodos y abundantes pelecípodos aberrantes llamados rudistas; principalmente de edad albiniana cenomaniana temprana (Cretácico Temprano tardío); localmente contiene abundantes nódulos, lentes y partículas irregulares de pedernal. |

Figura 2.3 Columna estratigráfica del distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (modificada de Geyne et al., 1963).

2.3 Fallas importantes de la zona de estudio.

En la zona de estudio (de Santa Rosa y San José Tepenené), y de acuerdo con Sánchez-Rojas *et al.* (1998), que son autores de la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) con clave F14D81 Pachuca, sobre la zona de estudio las principales fallas son: Capula Arévalo - Poniente, La Trinidad, parte oriente de la falla Cimbrones y la falla Zumbimbliá que rebasan en longitud los 4 km de extensión.

Falla Capula – Arévalo Poniente

Se localiza en la parte Sur de Los Frailes - El Águila, presenta una longitud de casi 4.5 km, desde la mina Samaria, pasa por la comunidad Capula, llega hasta la parte NE del poblado Mineral El Chico, en algunos sectores, albergan diques mineralizados. A lo largo de su rumbo se localizan las minas de La Samaria, La Soledad, San Eugenio, La Preciosa y San Pedro, con orientación N79°-83 ° W y echados de 81°-83° al SW.

Falla La Trinidad

Esta falla corta a rocas que forman al cerro El conejo y al cerro de Los frailes, tiene rumbo preferencial E -W y una longitud de un poco más de 5 km desde el cerro Los crestones por la barranca Peña blanca hasta la parte oriente del poblado de Santa Inés.

Falla Cimbrones

El rumbo que exhibe esta falla en la carta geológica minera F14D81 es E – W, sobre la zona de estudio tiene una longitud de aproximadamente 2 km, se extiende de forma paralela y al sur del río Cimbrones, también interceptando el río los toros.

Falla Zumbimbliá

La falla Zumbimbliá también conocida como falla Santa Cruz-Zumbimbliá, tiene una longitud de 4.5 km, con rumbo preferencial NW-SE.

Existen otras fallas de menor longitud de acuerdo con la carta geológico-minera de Pachuca (Sánchez-Rojas *et al.*, 1998) como son: Santa Cruz, Santo Niño, San José y San Felipe. Estas fallas presentan longitudes menores y encajonan vetas epitermales.

2.4 Vetas

De acuerdo con la cartografía geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y reportes técnicos (Valverde-Ramírez *et al.*, 1977; Orozco-Sánchez, 1979; De León-Chávez, 1982; González-Gallardo *et al.*, 1987; García-Castro, 1987; García-Castro *et al.*, 1988, 1988(a), 1988(b); Dueñas-García, 1989; De los Santos-Montaño, J., 1996). La zona de estudio está dentro de la zona mineralizada de Capula-Arévalo y Santa Rosa. En esta zona se han reconocido diques mineralizados de 50 m a 4000 m con espesores que varían de 0.4 m a 3.0 m. Las vetas que se han mapeado en trabajos antiguos del Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio Geológico Mexicano) son las vetas Reforma, La Trinidad, La Cruz, Reyper, Lupita, El Escribano, Arévalo poniente y la veta Bilbao. De acuerdo con Sánchez-Rojas *et al.* (1998), en la veta La Trinidad se reportan valores promedio de 69 g/Ton Ag y 0.29 g/Ton Au. En la mina Samaria a lo largo de la veta del mismo nombre se reportan valores 13 g/Ton Ag y 0.08 g/Ton Au. En la veta-falla Capula-Arévalo Poniente 90 g/Ton Ag y 0.42 g/Ton Au.

En el área de Santa Rosa Sánchez-Rojas *et al.* (1998) reportan estructuras mineralizadas que varían en longitud de 1500 m a 6000 m y espesores de 1.8 m a 50 m con direcciones NW-SE y que son cortadas por fracturas NE-SW. En la obra minera de Santa Rosa se calculó una ley promedio de 39 g/Ton Ag con 0.14 g/Ton Au; en la mina San Felipe se calcularon en ley promedio 60 g/Ton Ag y 0.29 g/Ton Au y en la mina Zumbimbliá 37 g/Ton Ag y 0.3 g/Ton Au. Muchos de estos datos de leyes de Au y Ag, son datos compilados por Sánchez-Rojas *et al.* (1998) de los archivos técnicos del Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio Geológico Mexicano, SGM).

2.5 Depósitos Epitermales de Intermedia y baja sulfuración

El DMP-RM es considerado un yacimiento de vetas tipo epitermal de baja sulfuración (Bonham, 1986; Heald *et al.*, 1987; y White y Hedenquist 1990; o sulfuración intermedia por Hedenquist *et al.*, 2000 en Camprubí *et al.*, 2018). Este tipo de yacimiento puede alcanzar entre 2 km a 1 km de profundidad, los controles de emplazamiento pueden ser fallas o zonas de fracturas relacionadas a zonas volcánicas, el rango de temperaturas de formación es de 100 a 320 °C (en casos excepcionales pueden superarse, aunque generalmente se forman de 150° a 230°C). La mineralización se da a través de fluidos hidrotermales que contienen salinidad baja entre 0–15% en peso de NaCl eq. y compuestos volátiles. La precipitación de minerales a partir de fluidos hidrotermales se puede producir a partir de fenómenos tales como ebullición, enfriamiento, mezclas entre diversos fluidos, o reacción entre los fluidos y las rocas circundantes (Camprubí *et al.*, 2018).

A este tipo de yacimientos se les asocia una alteración sericítica → argílica está última es dominante conforme disminuye la temperatura, también es común encontrar clorita. Como minerales de ganga se tiene principalmente el cuarzo y la calcedonia (generalmente en bandas), otros minerales que pueden aparecer son carbonatos como la calcita y rodocrosita, adularia diseminada y en vetas, alunita y pirofilita (escasas), barita y/o fluorita (localmente), barita comúnmente por encima de la mena y la illita (figura 2.4).

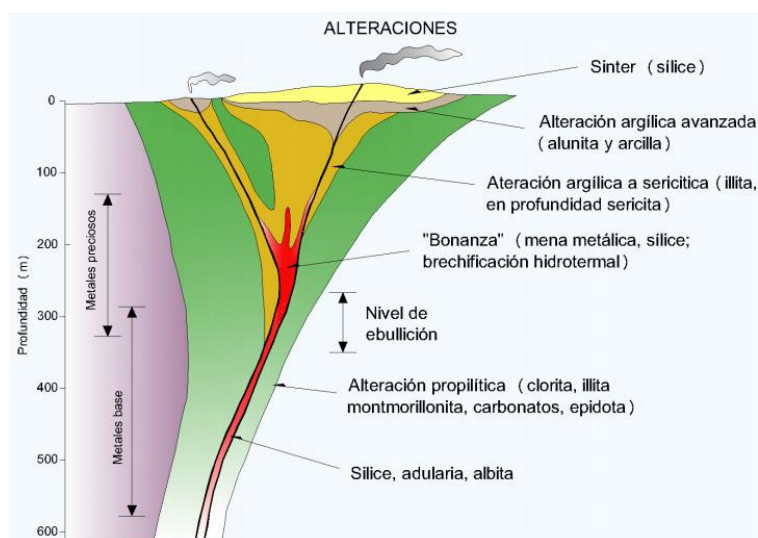


Figura 2.4 Esquema zonamiento típico de alteración para los depósitos de baja e intermedia sulfuración (modificado de Buchanan, 1981 tomado de González Pena, 2010).

Capítulo 3

Metodología

En el presente trabajo para resolver el problema planteado y lograr los objetivos, se emplearon varias metodologías. Las metodologías son una serie de pasos ordenados o conjunto de procedimientos para obtener los resultados o el conocimiento deseado según los objetivos que han sido planteados. Las metodologías empleadas en este trabajo fueron: investigación documental, cartografía geológica y geológico-minera, geología de campo, geología estructural, análisis estructural e integración (Figura 3.1). Cada una de estas metodologías empleadas se basan en el método científico, así como la disciplina de la geología en que se ha apoyado este trabajo principalmente, la geología estructural.

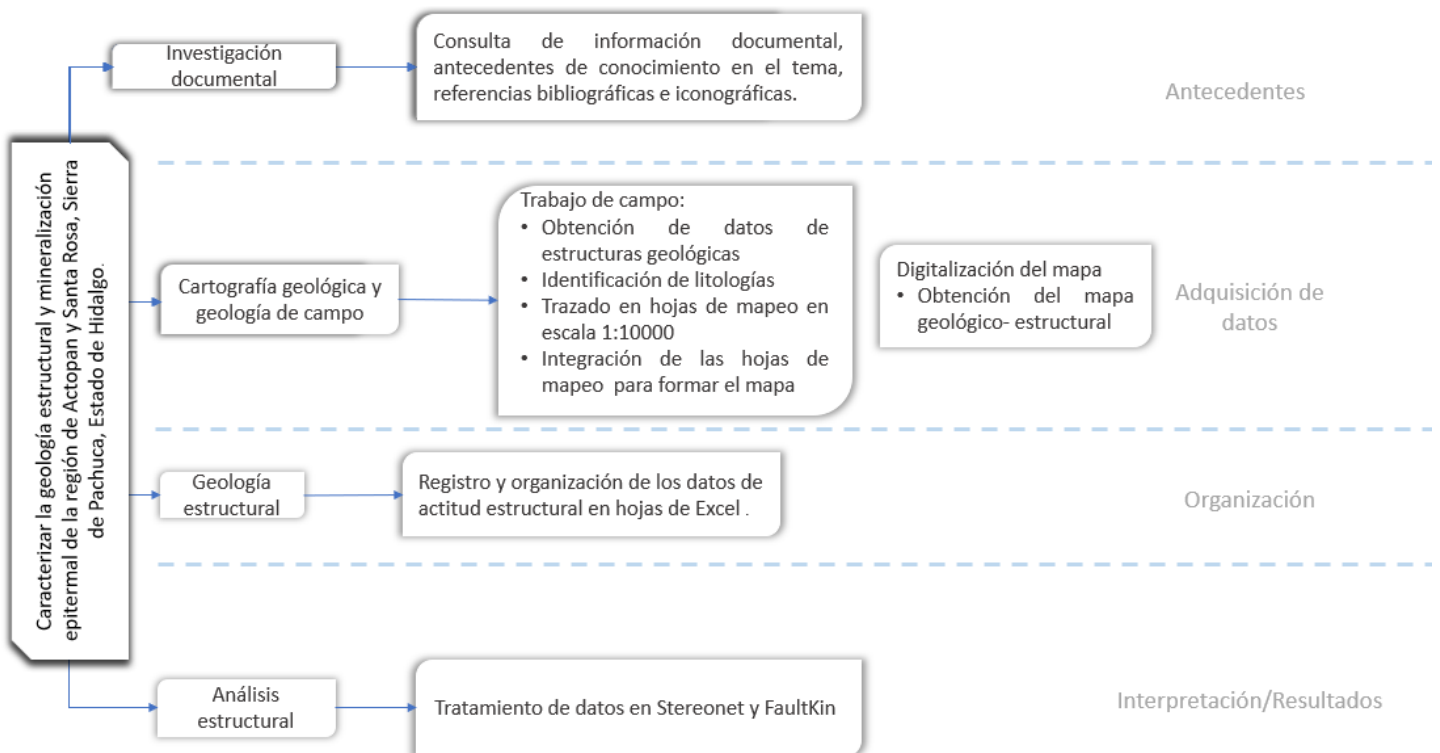


Figura 3.1 Esquema metodológico del trabajo desarrollado.

3.1 Investigación documental

Es la búsqueda y análisis previo de información relacionado al tema para argumentar y/o apoyar la hipótesis propuesta y la realización de nuevas teorías (referencia). Para este estudio han sido utilizados archivos técnicos de SGM (antes llamado Consejo de Recursos Naturales No Renovables), tesis, materiales de enseñanza de geología estructural, cartas geológicas y geológicas mineras de SGM y cartografía de INEGI.

3.2 Cartografía geológica y geología de campo

La cartografía geológica, como abstracción espacio-temporal de las rocas, es en sí un recurso didáctico esencial para la formación de los geocientíficos (Baker *et al.*, 2012), herramienta que logra plasmar a través de sus resultados los datos e información obtenidos por su creador como en este caso lo es el mapa que se presenta.

Para la realización del mapa geológico se utilizó la escala 1: 10 000 y geología de campo para recabar los datos cualitativos y cuantitativos geológicos como:–fracturas y fallas, identificación de las litologías, minerales y tipos de alteraciones. La obtención de estos datos en afloramientos se realizó de manera sistemática y ordenada.

En campo sobre cada afloramiento se ubicó el punto empleando un receptor GPS esto para controlar el mapeo de los datos, posteriormente se realizó un croquis orientado y escalado, posteriormente se definieron los materiales litológicos del lugar y al final se registraban los rumbos y echados (actitud estructural) y estrías de falla de las estructuras de deformación sobresalientes, para posteriormente ser mapeados en las hojas de herculene de tamaño carta dividida en cuadros de 5 cm por 5 cm cada uno y con las coordenadas en sistema UTM–Norte y Este en metros. Los datos de los rasgos estructurales han sido plasmados a escala 1:10000. Posteriormente se pasaron los datos a un pliego de papel herculene para escanearlo y digitalizarlo.

3.3 Geología estructural

La geología estructural es el estudio de la geometría, cinemática y dinámica de las estructuras de deformación que se presentan en las rocas de la corteza terrestre. Se entiende como estructuras de deformación a las estructuras planares, lineales y con curvatura en las rocas como: foliaciones, lineaciones, pliegues, fallas y fracturas. En este trabajo se trabajó con estructuras de deformación en un régimen frágil-quebradizo como fallas y fracturas que se formaron en la corteza superior y que algunas contienen vetas de cuarzo y alteraciones hidrotermales.

Los datos estructurales se colectaron en campo con el empleo de la brújula tipo Brunton y regletas de escala (rumberas). Los datos que se colectaron fueron actitudes estructurales (rumbo y echado) así como el ángulo de pitch de cada superficie de falla que presentaba estrías. Estos datos se vaciaron a hojas de datos en excel, ordenando los datos con sus coordenadas respectivas y valores estructurales de su orientación.

3.4 Análisis estructural

Los datos estructurales ordenados en excel se trabajaron con el software stereonet y FaultKin, para realizar un análisis en gabinete y después integrar estos resultados con las relaciones de corte entre estructuras de deformación que se obtuvieron en campo.

Los resultados de cartografía geológica y geología de campo se integraron con los datos del análisis estructural para determinar las relaciones geométricas en las estructuras de deformación y establecer una secuencia de formación de estructuras, así como posibles relaciones de la deformación de las rocas con las estructuras de mineralización y las alteraciones hidrotermales.

Capítulo 4 Estratigrafía

En la zona de estudio afloran rocas volcánicas y subvolcánicas del Cenozoico algunas de estas rocas son de tipo andesitas, riodacitas y volcanoclásticos principalmente. En este trabajo se identificaron 4 unidades entre ellas dos formaciones previamente identificadas en otras áreas de la Sierra de Pachuca por Geyne *et al.* (1963) y dos unidades de rocas que se proponen por vez primera en este trabajo, descartando los depósitos aluviales y fluviales que cubren a estas unidades en el área (figuras 4.1 y 4.2). Las unidades que se describen son la Formación Vizcaína, unidad San José, Formación Zumate y la unidad Santa María. Se describen a continuación de la más antigua a la más joven.

Mapa estructural de la Región de Actopan y Santa Rosa

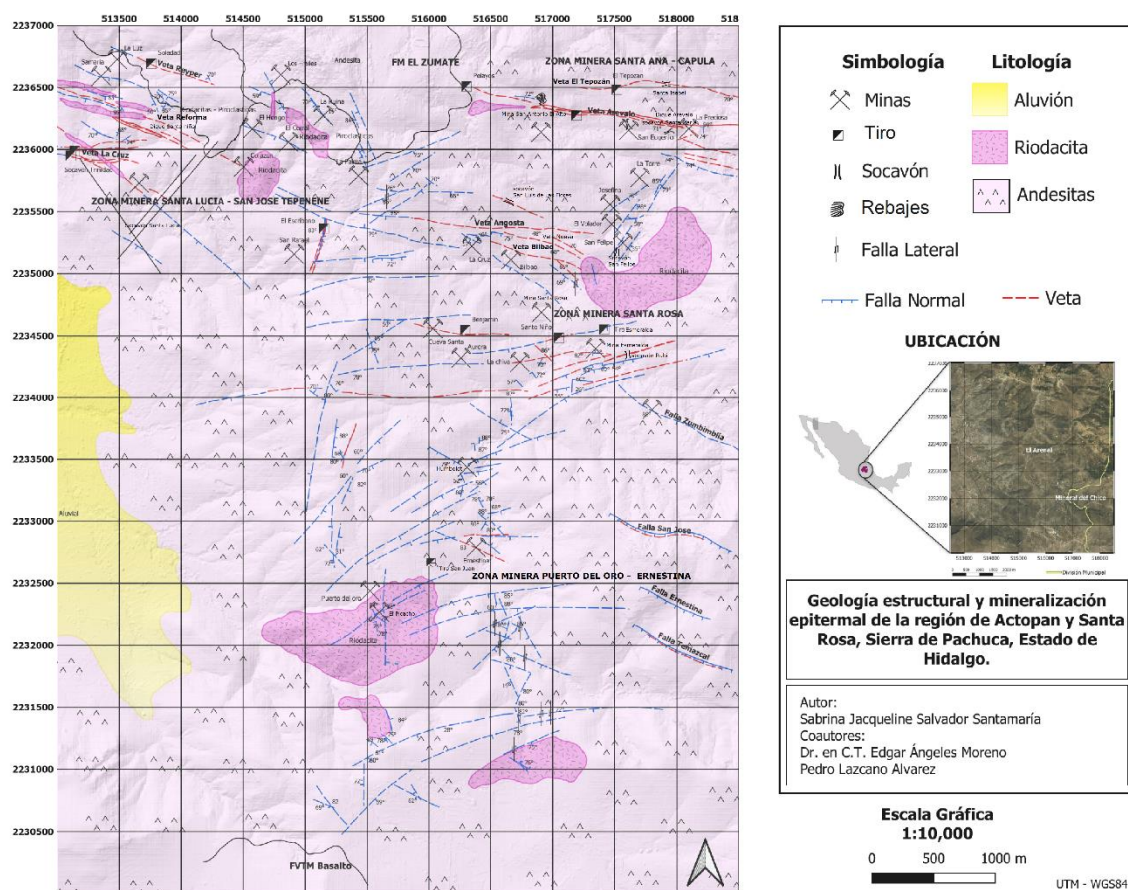
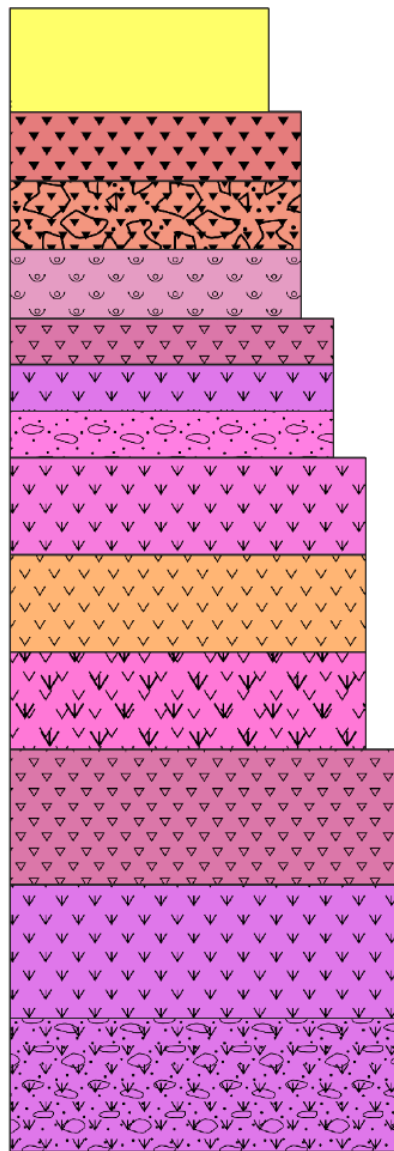


Figura 4.1 Mapa geológico estructural del área de San José Tepenené y Santa Rosa

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA



DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

(Q-df)

Depósitos aluviales y fluviales de arenas, limos y gravas

UNIDAD
SANTA MARÍA
(Q-sm)

Basaltos y autobrechas basálticas, depósitos piroclásticos andesítico - basálticos (Conos cineríticos)

FORMACIÓN
ZUMATE
(PI-fz)

Flujos de lava andesitas y dacitas, aglomerados dacítico y volcanoclástico

UNIDAD
SAN JOSÉ
(M-sj)

Domos riodacíticos, diques riodacíticos y riolíticos. Depósitos piroclásticos riodacíticos

FORMACIÓN
VIZCAINA
(M-fv)

Flujos lavicos andesíticos y dacíticos, volcanoclasticos, andesíticos y dacíticos. Diques andesíticos. Texturas Porfídicas

Figura 4.2 Columna estratigráfica esquemática del área de estudio

4.1 Formación Vizcaína

La Formación Vizcaína fue definida por Geyne *et al.* (1963) en el área de Pachuca y Real del Monte, como una secuencia de derrames de lava y brechas volcánicas de composición andesítica y dacítica con texturas porfídicas con planos de diaclasas y algunos dobleces de la lava; estos derrames estratificados con algunas capas de tobas, areniscas y brechas tobáceas. Las mediciones de secciones estratigráficas en secciones transversales de Geyne *et al.* (1963) muestran que en las áreas circundantes donde se conserva el espesor original completo de la Formación Vizcaína, tiene entre 500 y 600 m de espesor y está localmente cubierto por restos erosivos, de 20 a 200 m de espesor, de riolita y rocas sedimentarias volcánicas de la secuencia superior.

En este trabajo la Formación Vizcaína se reconoció en las áreas mineras de Arévalo, Santa Rosa, San José Tepenené y Puerto del Oro (ver mapa geológico figura 4.1 y columna de la figura 4.2). La unidad está compuesta de flujos lávicos andesíticos y dacíticos, rocas volcanoclásticas andesíticas y dacíticas. Así como diques andesíticos (figura 4.3).

Las andesitas presentan texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasas en una matriz afanítica de color verde. Los derrames de andesita presentan en ocasiones estructura de foliación de flujo, así como diaclasas de enfriamiento que son paralelas a las estructuras de flujo. En ocasiones no se presentan las estructuras de flujo y se presentan con una estructura masiva. En algunos sectores se pueden distinguir autoclastos de la misma composición andesítica con texturas porfídicas.

Los derrames dacíticos están estratificados con los derrames andesíticos, y las rocas dacíticas presentan texturas porfídicas con una matriz afanítica de color gris claro. En ocasiones no es fácil distinguir los derrames andesíticos de los dacíticos, a menos que se vean con detalle en la presencia y proporción de fenocristales de cuarzo.

Los diques andesíticos aparecen cortando a los derrames andesíticos y a veces a los derrames dacíticos. Las texturas de los diques varían de afanítica a porfídica, y presentan un borde quemado en ocasiones en relación con la roca que intrusionan. Se presentan en varias orientaciones, desde verticales a subhorizontales y no es fácil distinguirlos de los derrames andesíticos a menos que se ponga cuidado en los cambios texturales de la roca.

Las rocas volcanoclásticas andesíticas y dacíticas se presentan con estructura de flujo, tienen texturas porfídicas a afaníticas y se observa muchos clastos subangulosos a subredondeados de clastos de roca volcánica andesítica con texturas porfídicas. Estas rocas volcanoclásticas aparecen estratificadas con los derrames lávicos y parecen haberse formado simultánea o cercanamente en el tiempo de emplazamiento.

Las rocas volcánicas de la unidad se encuentran basculadas hacia el norte con un ángulo que varía de 10° a 20° , este basculamiento está relacionado con fallamiento y se observó en las cercanías de la mina La Trinidad. Las rocas también están afectadas por fracturamiento y fallamiento, así como por alteraciones hidrotermales. Estas características se describirán en capítulos siguientes.

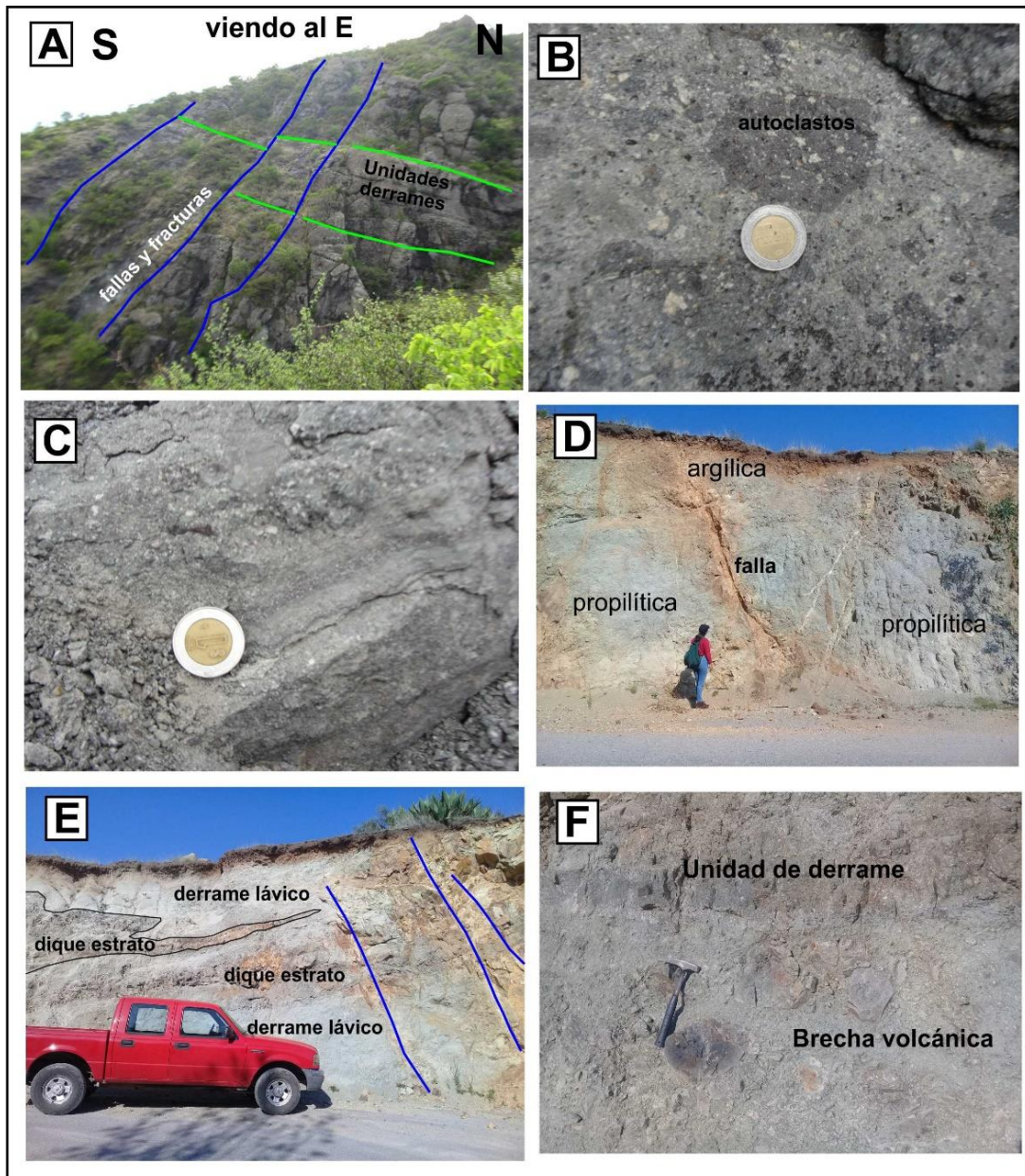


Figura 4.3 Afloramientos de la Formación Vizcaína en el área de Actopan, San José Tepenené y Santa Rosa. A, Unidades de derrames andesíticos separados por superficies de enfriamiento, se encuentran basculadas hacia el Norte y afectadas por fallas normales, área de La Trinidad. B, Flujos de andesitas con abundantes autoclastos andesíticos porfídicos, área de Capula-Arévalo. C, capas de depósitos piroclásticos andesíticos con variación textural y tamaño de grano. D, andesitas con alteración propilitica afectados por fallas con alteración argilica. E, diques y diquestratos andesíticos con textura afanítica afectan a andesitas. F, brechas volcánicas andesíticas intercaladas con derrames lávicos andesíticos.

4.2 Unidad San José

La unidad San José aflora en varias partes del área de estudio. Está presente en las zonas mineras Santa Lucía-San José Tepenené, zona minera Santa Ana-Capula, zona minera Santa Rosa y zona minera Puerto del Oro (ver mapa geológico figura 4.1). Esta unidad no se había reconocido en antiguos trabajos mineros y de geología en la región. La unidad San José toma el nombre de San José Tepenené ya que ahí aflora un domo riodacítico que es claro en su expresión morfológica. Esta unidad está compuesta de domos riodacíticos, diques riodacíticos y riolíticos, así como depósitos piroclásticos riodacíticos.

Los domos riodacíticos con forma morfológica cóncava, se componen de roca de tipo riodacítica presentan bandeamiento de flujo y pliegues de flujo. La roca riodacítica presenta una textura porfídica con fenocristales de cuarzo y feldespato en una matriz afanítica de vidrio volcánico. Los tipos de domos volcánicos son exo-domos y de criptodomos por lo que se observó en el campo, ya que algunos domos solo afloran parcialmente. Los domos cortan a las rocas andesíticas y dacíticas de la Formación Vizcaína, esto se aprecia muy bien en la zona minera de San José Tepenené en la parte Sur de las peñas Los Frailes y en el área de Santa Rosa y Puerto del Oro. De los domos se desprenden diques riodacíticos con estructura bandeada a veces ondulada con pliegues de flujo.

Los diques son comunes en el área de estudio y su composición varía de riolítica a riodacítica. Algunos diques tienen amplia longitud y otros se presentan con longitudes más cortas en superficie. Los diques de lo cartografiado en campo e integrado tienen longitudes que varían de 3 km de longitud a 0.5 km. Los espesores de los diques son variables, en el campo se observaron espesores de 3 m a 0.3 m. La geometría de los diques es ondulada tanto vertical y horizontalmente algunos diques están conectados o enlazados formando estructuras ígneas ramaleadas de diques conectados. Los diques presentan varias orientaciones que son: WNW-SSE y E-W. Los diques más importantes en la zona son el dique Arévalo y dique Santo Niño (Figura 4.1).

Los diques se emplazaron en fracturas y fallas ya que la orientación de las fracturas coincide con muchos diques de la unidad San José. Algunos diques muestran alteración hidrotermal y otros no.

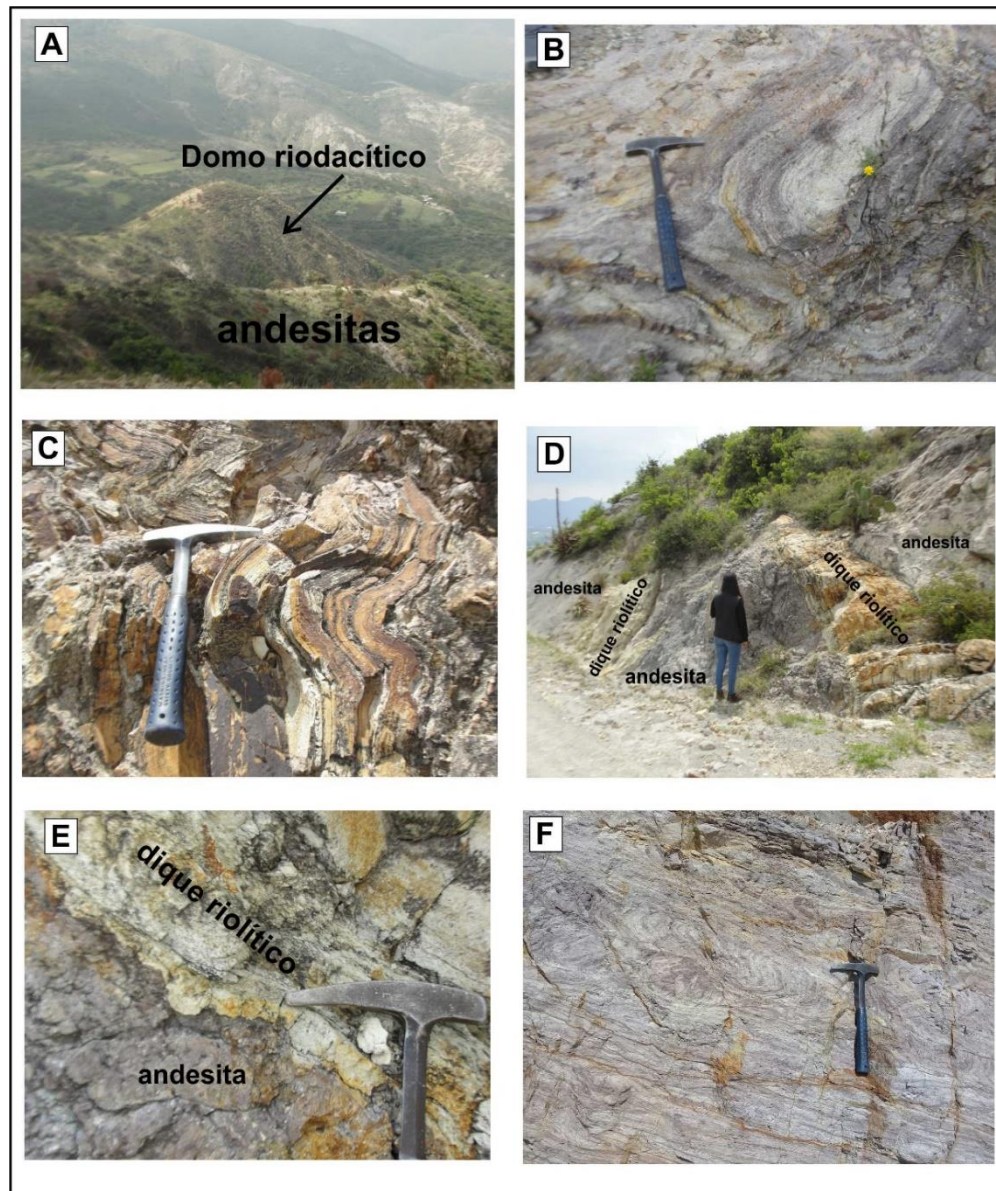


Figura 4.4 Afloramientos con estructuras magmáticas de la unidad San José. A, Domo riodacítico entre las Peñas Los Frailes y San José Tepenené, corta a andesitas de la Formación Vizcaína. B, foliación de flujo y pliegues de flujo en dique riodacítico enfrente de las Peñas Los Frailes. C, pliegues de flujo en dique riolítico a lo largo del camino San José Tepenené a San Jerónimo. D, diques riolíticos que cortan a andesita de la Formación Vizcaína, en área minera de Santa Lucía-San José Tepenené. E, acercamiento de contacto dique riolítico con andesita del punto D. F, pliegues de flujo en riolitas en domo riolítico en Puerto del Oro.

Los diques que muestran alteración hidrotermal están cortados por vetillas y vetas de cuarzo epitermales y algunos presentan estructura brechada por fallamiento (Figura 4.4).

La unidad San José se correlaciona en características litológicas y edad relativa por posición estratigráfica con la Formación Cerezo que fue definida por Geyne *et al.* (1963) en la zona minera de Pachuca y Mineral del Monte.

4.3 Formación Zumate

La Formación Zumate fue definida por Geyne *et al.* (1959) en Geyne *et al.* (1963) como una secuencia de derrames, brechas de derrame, aglomerados y rocas volcánicas epiclásticas de composición dacítica y su nombre lo toma de la peña del Zumate, pueblo del mismo nombre, propuesto por Geyne *et al.*, 1959. Geyne *et al.* (1963) las describe con estructura foliada y masiva con texturas porfídicas, con capas estratificadas de material tobáceo y lahárico con capas basales tobáceas y de detritos volcánicos de hasta 20 m de espesor. El espesor máximo para esta unidad es de 360 m de acuerdo con lo descrito por Geyne *et al.* (1963).

En este trabajo la Formación Zumate aflora en los alrededores de las Peñas Los Frailes. La formación presenta una secuencia de derrames lávicos que varían de andesíticos a dacíticos estratificados con flujos de brechas volcánicas y volcanoclásticos de la misma composición (figura 4.5). En la base de los Frailes aparece un nivel basal con espesor mínimo de 10 m que está marcado por la presencia de capas de rocas piroclásticas dacíticas de color verde y que presentan líticos de rocas andesitas, dacitas y basalto. Las capas de rocas de la Formación El Zumate no presentan tanta inclinación como las rocas de la Formación Vizcaína y esto define una discordancia angular entre las dos formaciones. Los diques riodacíticos de la unidad San José intrusionan a la parte basal piroclástica de la Formación El Zumate (figura 4.5). Esto se observó enfrente de las Peñas Los Frailes en el camino de terracería que va de San José Tepenené al poblado de San Jerónimo.

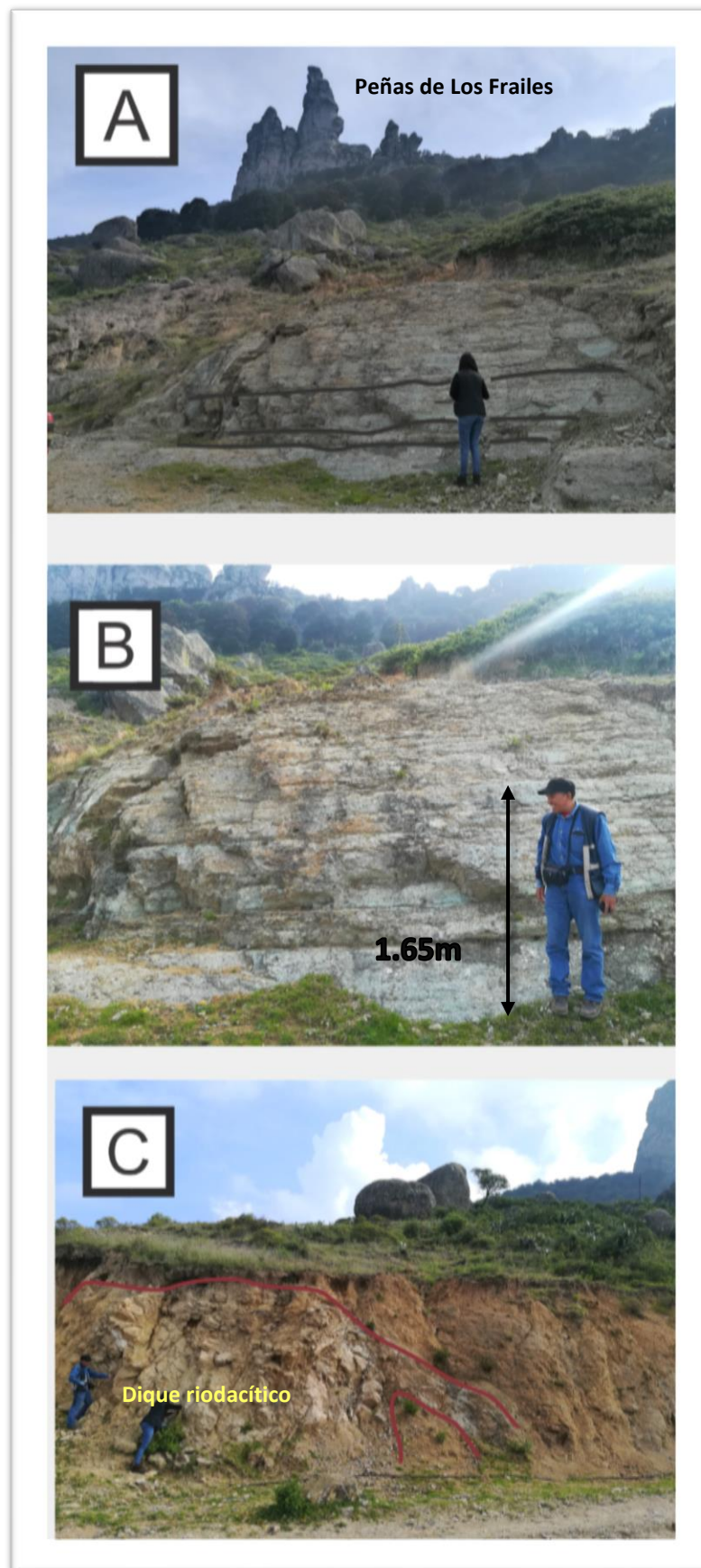


Figura 4.5 Afloramientos de la Formación Zumate en el área de estudio. A y B Afloramiento de la formación Zumate donde se observa los flujos lávicos en capas casi horizontales. C, Diques riódacíticos de la unidad San José intrusionan a la parte basal piroclástica de la Formación El Zumate.

4.4 Unidad Santa María

La unidad Santa María se define en este trabajo por vez primera. Esta unidad aflora en la parte sur del área de estudio en las cercanías de Puerto La Palma y tiene una amplia extensión hacia las poblaciones de San Juan Solís y Santa María.

La unidad se compone de derrames basálticos con flujos de brechas volcánicas y autobrechas de composición andesítico basálticas y depósitos piroclásticos. Estas rocas extruyeron de conos cineríticos y piroclásticos. Los derrames basálticos presentan texturas masivas y a veces vesiculadas con algunos fenocristales de plagioclasas, piroxenos y a veces olivino. Los derrames en ocasiones cubren depósitos piroclásticos con granulometría de lapilli y bloques. Los depósitos piroclásticos son lapilli y bloques andesítico-basálticos, cenizas volcánicas y escorias basálticas rojas y negras. Cenizas volcánicas básicas e intermedias son comunes en esta unidad.

La unidad cubre discordantemente a la Formación Vizcaína en la parte sur del área de estudio. Esto se observa en el Sur-Poniente del poblado de Puerto La Palma y al norte de San Juan Tilcuautla (figura 4.6).

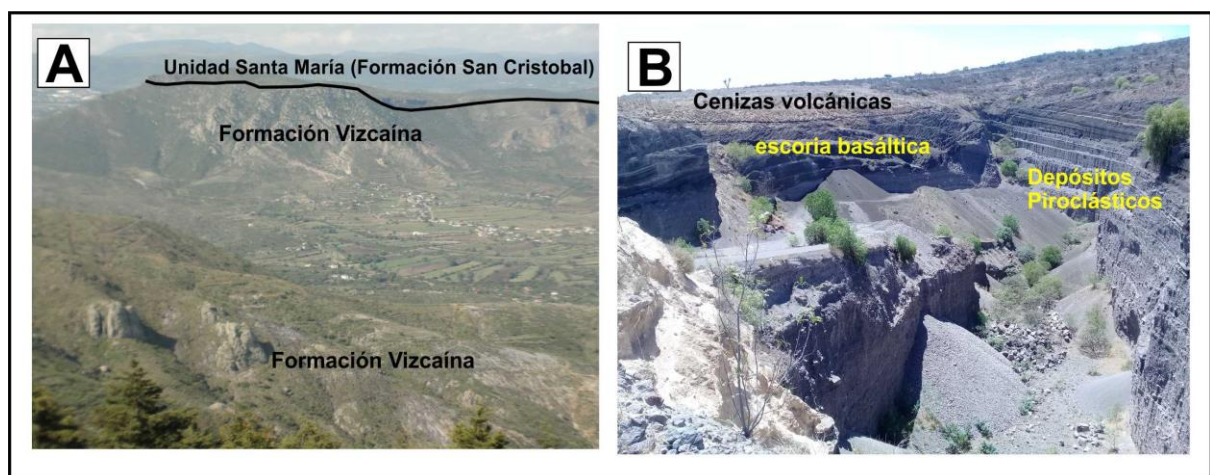


Figura 4.6 Afloramientos de la unidad Santa María. A, vista al Sur desde las peñas Los Frailes, se observa discordancia entre la unidad Santa María y rocas volcánicas del Grupo Pachuca. B, cono piroclástico con depósitos de escoria basáltica y piroclásticos, conos cineríticos entre San Juan Solís y Santa María.

La edad de esta unidad se interpreta del Cuaternario. Ya que en la región y en la parte Sur-Poniente afloran abundantes conos cineríticos basálticos con escoria y tezontle (carta geológico-minera Pachuca de SGM, Sánchez-Rojas *et al.*, 1998). Estos conos están alineados con fracturas NE-SW y fracturas E-W.

La unidad Santa María se correlaciona con la Formación San Cristóbal que es descrita en la carta geológico-minera del SGM (Sánchez-Rojas *et al.*, 1998) y por Geyne *et al.*, (1963) como una secuencia de derrames de lava, capas clásticas con bloques y bombas y escorias; de edad del Plio-Cuaternario.

Capítulo 5

Geología Estructural

En este capítulo se describen las fracturas, fallas y vetas-falla de las diferentes zonas mineras del área de estudio (figura 5.1) y se presentan las rosetas y estereogramas realizados a partir de los datos tomados en las salidas a campo.

5.1 Zona minera Santa Ana-Capula

En esta zona las estructuras principales son las fallas Capula-Arévalo y la falla El Tepozán. Los datos estructurales de las fracturas y fallas de esta zona minera se muestran en los estereogramas de la figura 5.2 y datos numéricos en tablas de anexos.

Veta-falla Capula-Arévalo

La falla Capula-Arévalo es descrita en trabajos geológicos-mineros del SGM (Sánchez-Rojas *et al.*, 1998) como veta que tiene asociado un dique riodacítico y que tiene una longitud de más de 6 km llegando a extenderse hasta la población de Capula.

En este trabajo, esta estructura se cartografió a lo largo de su rumbo con una extensión de cerca 2.6 km desde la mina La Preciosa, hasta cerca del tiro Pelayos. Es una zona de falla con fracturas que tiene un dique riodacítico a lo largo de la estructura y presenta vetas ramaleadas epitermales siguiendo el rumbo de la zona de falla. Presenta un rumbo N80°W a E-W con echado que varía de 60° a 75° al SW y Sur. De acuerdo con los indicadores cinemáticos y estrías de fallas es una falla de tipo normal y contiene rocas de falla de tipo brechas de falla con zonas de salbanda de falla, el ancho de la zona núcleo de la falla no es claro, pero se observó un ancho mínimo de 0.4 m, pero en algunos lugares se observaron anchos de 1.5 m. La falla afecta a andesitas de la Formación Vizcaína y parece también afectar al dique riodacítico de Arévalo.

La falla no parece estar cubierta por otros depósitos volcánicos. La falla se correlaciona por orientación y longitud con las fallas que contienen vetas importantes en el distrito minero como la veta Vizcaína.

Veta-falla El Tepozán

La falla El Tepozán contiene una veta epitermal. Esta estructura se ubica hacia el norte de la veta-falla Capula-Arévalo y tiene un rumbo que varía de E-W a N80°W con echado de 70° al Sur. A lo largo de esta veta-falla se ubican las obras mineras tiro El Tepozán y Socavón Santa Isabel. La veta-falla corta a rocas volcánicas de la Formación Vizcaína.

Mapa estructural de la Región de Actopan y Santa Rosa

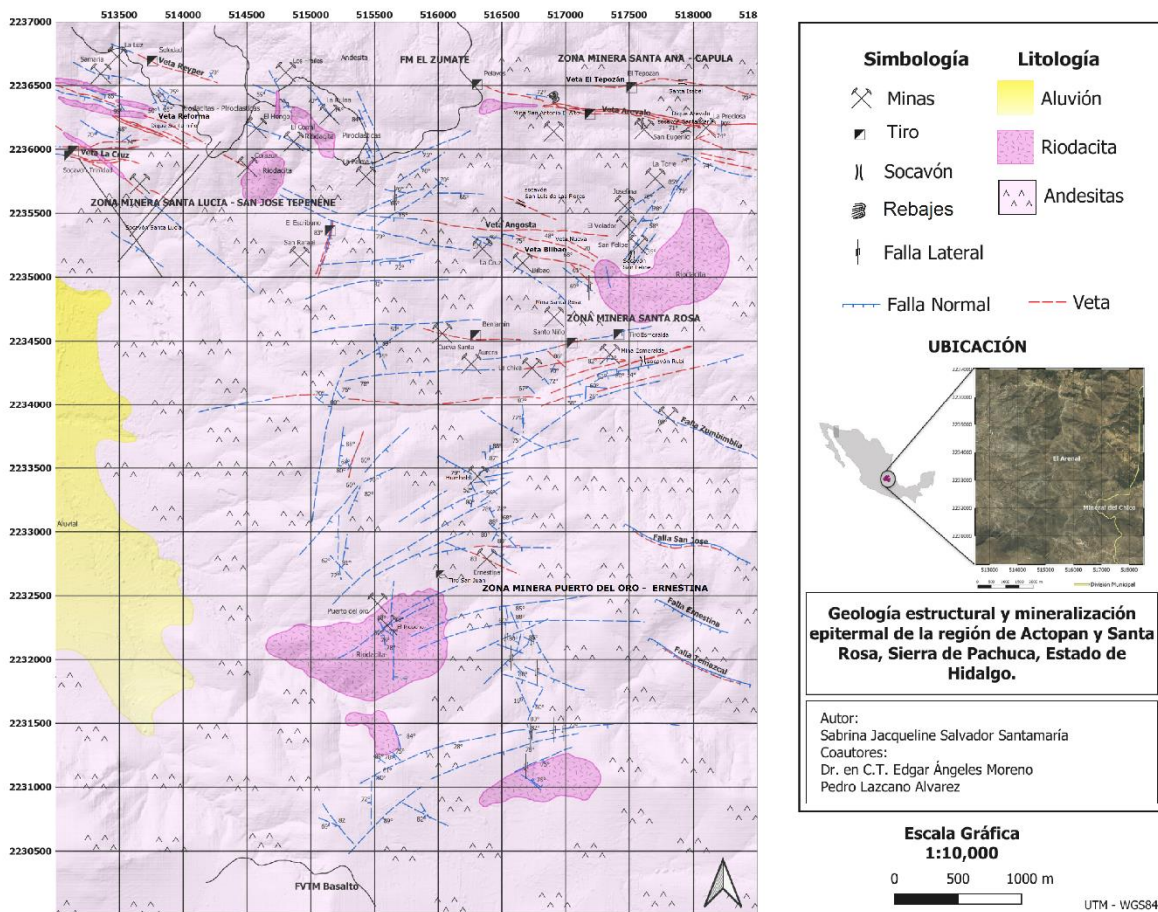


Figura 5.1 Mapa geológico-estructural del área de estudio.

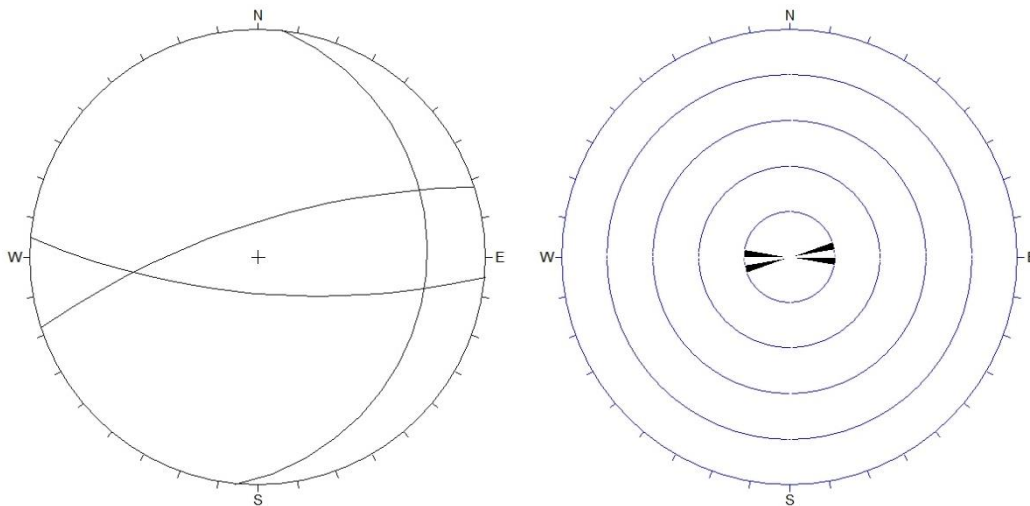


Figura 5.2 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Ana - Capula a partir de 3 datos, ver tabla A1 en anexo

5.2 Zona minera Santa Rosa

En la zona minera Santa Rosa aparecen una serie de grupos de fallas (ver mapa geológico-estructural figura 5.1) que se describen a continuación y que fueron representadas en estereogramas (figura 5.3).

5.2.1 Fallas San Felipe

Las fallas San Felipe se localizan entre la veta Bilbao y la veta-falla Arévalo. Tienen una longitud variable de 300 m a 700 m con una orientación que varía de N40°E a N60°E y echado de algunas fallas de 70° a 80° al Noroeste (NW) y Oeste (W). Algunas de estas fallas contienen mineralización en forma de veta mientras otras fracturas o fallas no contienen. A lo largo de algunas fallas se localizan las obras mineras: Josefina, La Torre, El Volador y el socavón San Felipe (ver mapa geológico, figura 4.1). La cinemática no se pudo definir. Las rocas de falla que se presentan son brechas de falla y afecta a rocas riodacíticas y andesíticas de la unidad San José y Formación Vizcaína.

Este conjunto de fallas y vetas-falla San Felipe parecen no cortar a la veta-falla Capula-Arévalo y sugiere una formación simultánea de estas fallas.

5.2.2 Fallas y vetas-falla La Cruz

Las fallas y vetas-falla La Cruz se ubican en la parte Norte del poblado minero antiguo de Santa Rosa a unos 700 m de distancia al NW. La longitud que alcanzan estas fallas va de 300 m a 2 km. A lo largo de estas fallas se localizan las obras mineras La Cruz, Bilbao, Los Pilares y San Luis de Las Flores. Estas estructuras comprenden fracturas y fallas con dirección N85°W a N55°W con echados variables de 50° a 70° al Sur y otro conjunto de fracturas con direcciones NE-SW aunque son las menores en cantidad. Muchas de estas estructuras son fallas de tipo normal y afectan a rocas volcánicas de la Formación Vizcaína y rocas riodacíticas de la unidad San José.

Las fallas más importantes son aquellas que contienen a las vetas La Cruz y veta La Nueva. En el interior del socavón La Cruz se observa a la veta La Cruz y veta Bilbao que corta a brechas de fallas y salbanda de la zona núcleo de falla.

5.2.3 Fallas y vetas-falla Santa Rosa

Las fallas y vetas-falla Santa Rosa están localizadas en la zona del poblado antiguo de Santa Rosa y se ubican por los alrededores de la iglesia de Santa Rosa. Las fallas tienen longitudes variables de 0.6 km a 4.5 km. Se presentan tres orientaciones de fracturas y fallas, unas con actitud estructural que varía de E-W a N70°E y echados de 50° a 80° al Sur, otras con orientación N-S, y otras con N60°W a N40°W. Las más abundantes son las del primer grupo E-W (figura 5.3). La cinemática es variable a veces con comportamiento de tipo normal y otras de fallas oblicuas. Las rocas de falla se presentan mejor definidas en las estructuras más importantes que contienen vetas de cuarzo y son brechas de falla y salbanda, como lo observado en el interior del socavón de La Esmeralda. Las brechas de falla y salbanda son rodeadas por una zona de daño compuesta de fracturas.

Las rocas afectadas por estas fallas son las andesitas de la Formación Vizcaína pero también a las rocas riodacíticas de la unidad San José.

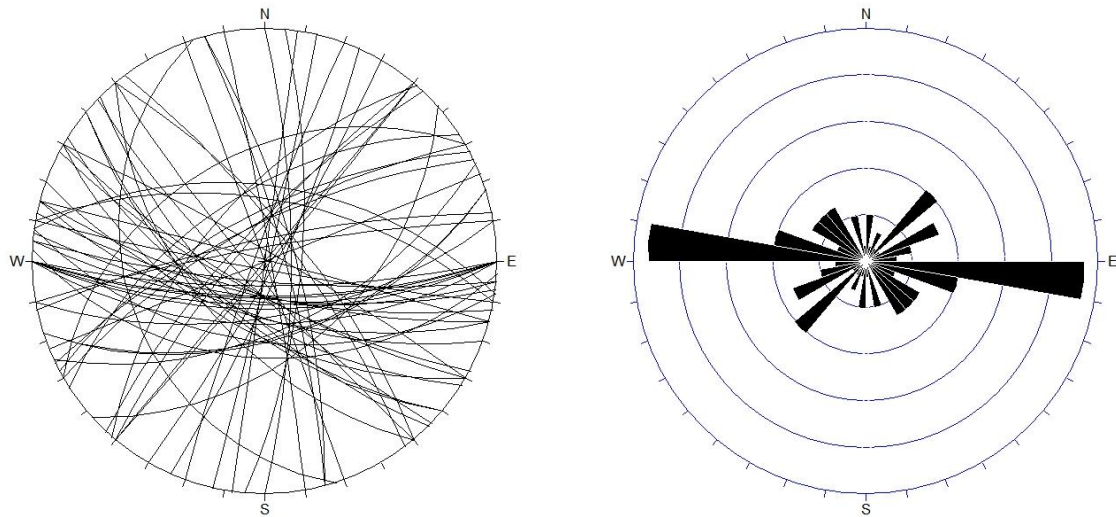


Figura 5.3 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Rosa a partir de 68 datos, ver tabla A2 en anexos.

5.3 Zona minera Santa Lucía-San José Tepenené

La zona minera Santa Lucía-San José Tepenené contiene varias fallas y vetas-falla como son las vetas-falla del área de La Trinidad, vetas-falla del área Samaria, y vetas-falla y fracturas localizadas al pie de las Peñas Los Frailes. Estas estructuras se muestran en el mapa geológico-estructural de la figura 5.1 y están representadas sus orientaciones en el estereograma de la figura 5.6.

5.3.1 Vetas-falla del área La Trinidad

Las vetas - falla del área La Trinidad se encuentran entre la veta El Escribano y la veta Reforma poseen longitudes variables de 0.3 km a 1.4 km para la veta Trinidad, cuentan con una orientación NE – SW y otra NW - SE con echados de 74° SE y 68°-70° SW respectivamente. Esta falla se considera como veta ya que se encuentra mineralizada, aunque las fracturas de esta zona no se encontraban mineralizadas. Cerca de esta área se localiza la obra minera socavón Trinidad cercana también un pozo y un tiro, a 600 m aproximadamente en dirección al SE se encuentra el socavón Santa Lucía. Esta veta-falla

corta a diques riódacíticos que pueden formar parte del dique Santo niño. Las fallas a las que se les pudo definir su cinemática resultaron del tipo de falla normal.

5.3.2 Vetras-falla del área Samaría

Estas vetras se localizan entre la veta Reforma y la veta Reyper, entre estas dos vetras se encuentra la falla y la mina Samaría. Las fallas encontradas en este trabajo cuentan con longitudes variables de 0.2 km a 0.6 km con una orientación principalmente S35°E – S80°E y echados entre 60°-82° SW. La cinemática para estas fallas es del tipo normal derecha e izquierda. Las rocas de falla son brechas que afectan a riódacitas de la formación el Zumate y la Unidad San José.

5.3.3 Vetras-falla y fracturas enfrente de Los Frailes

Estas vetras-falla se encuentran alrededor de las vetras de los frailes cercanas al camino que va al poblado de San Jerónimo. Aquellas que se encuentran sobre la formación El Zumate tienen una longitud variable de 0.1 km a 0.3 km con notable orientación NW-SE y echados de 50°-81° NE (figura 5.4).

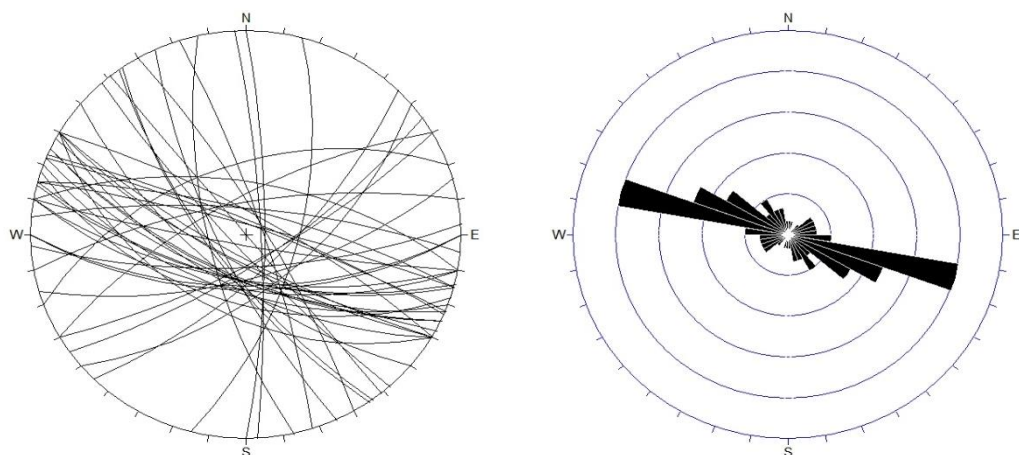


Figura 5.4 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera de Santa Lucía - San José Tepenené obtenidos a partir de 48 datos (datos estructurales en tabla A3 en los anexos).

Cerca de estas estructuras se encuentran las minas Los Frailes y mina La Ruina, así como las obra minera del socavón Verdum.

La cinemática de estas fallas es de tipo normal (Figura 5.5). Las rocas de falla de esta área son brechas de falla. Las fallas se encuentran afectando a rocas andesíticas y dacíticas de la formación El Zumate y no cortan al dique riódacítico que se encuentra al sur de la mina Los Frailes.



Figura 5.5 Estrías en los afloramientos de rocas ígneas ácidas con alteración argílica y limonitas cercanos a las peñas de Los Frailes.

5.4 Zona minera Puerto del Oro-Ernestina

En esta zona minera se presentan varios grupos de fracturas y fallas los cuales presentan orientaciones NE-SW, NW-SE, WNW-ESE y en menor cantidad N-S (Figuras 5.6). A continuación, se describen los grupos de fallas NE-SW y NW-SE.

5.4.1 Fallas NE-SW

Estas fallas de orientación NE-SW predominan cercanas a las obras mineras de Puerto del Oro y Picacho. Las fallas cuentan con una longitud que alcanza los 10 km. La orientación predominante NE-SE tiene echados 60° - 70° NW y existen también algunas fracturas alrededor de orientación oblicua a estas fallas. La cinemática de las fallas cartografiadas es de tipo normal predominantemente. Las rocas de falla son brechas que afectan a las riolacitas de la unidad San Juan.

5.4.2 Fallas NW-SE

Las fallas NW-SE de la zona minera Puerto del Oro-Ernestina fueron mapeadas en el camino de la barranca Honda al oeste de la falla San José y la falla Ernestina (ver mapa geológico, Figura 4.1). Las fallas de esta zona tienen longitudes que van de 0.1 km a los 0.6 km. Dentro del área se encuentra el tiro San Juan. Las fallas NW-SE (figura 5.6) cuentan con echados de 83° SW y 89° NW. La cinemática es de tipo normal con componentes derecha o izquierda en algunos casos. Las rocas de falla son brechas de falla que afectan a los flujos andesíticos de la zona.

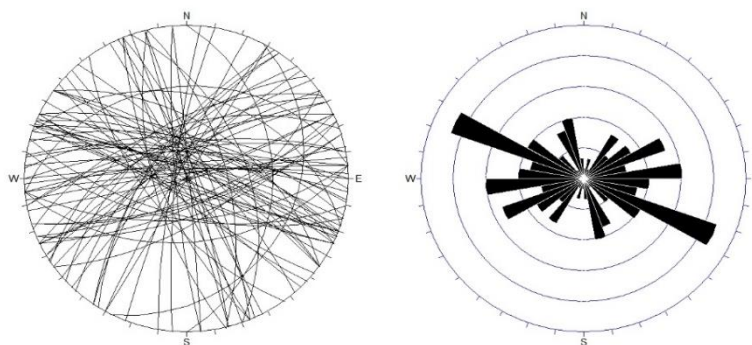


Figura 5.6 Estereograma y roseta de todas las fallas obtenidas en campo de la Zona minera Puerto del Oro-Ernestina obtenidos a partir de 78 datos (datos numéricos en anexos en tabla A4).

Capítulo 6

Estructuras, texturas de mineralización y alteraciones hidrotermales

6.1 Estructuras de mineralización

6.1.1 Tipos de vetas epitermales

Las vetas epitermales en el área de estudio tienen estructuras variables que se presentan como vetas ramaleadas, en stockwork, vetas subparalelas y vetas de una sola estructura (figura 6.1).

Las vetas ramaleadas presentan geometrías ramificadas y desprendimientos. La mineralogía que presentan es cuarzo, calcita, limonitas y óxidos de manganeso. Las limonitas y óxidos de manganeso son por general minerales supergénicos.

El stockwork que se observó dentro del área de estudio, comprende a una serie de vetillas que varían su espesor de escala de centímetros a decímetros. Las texturas en cada una de las vetillas de cuarzo que se observó son texturas de peine y bandeamiento con algunas drusas de cuarzo pequeñas.

Las vetas comúnmente cortan a las rocas andesíticas de la Formación Vizcaína y las riodacitas de la unidad San José. Las vetas se emplazan en fallas y fracturas que se presentan en las áreas mineralizadas descritas anteriormente. En algunas obras mineras como en el socavón La Cruz (figura 6.1), la mina La Trinidad (figura 6.1), socavón La Esmeralda y La Preciosa, se observaron a las vetas cortando a brechas y salbandas de falla, sin embargo, en otras ocasiones se observaron siendo afectadas por fallamiento ya que se presentaban brechados los fragmentos de cuarzo epitermal.

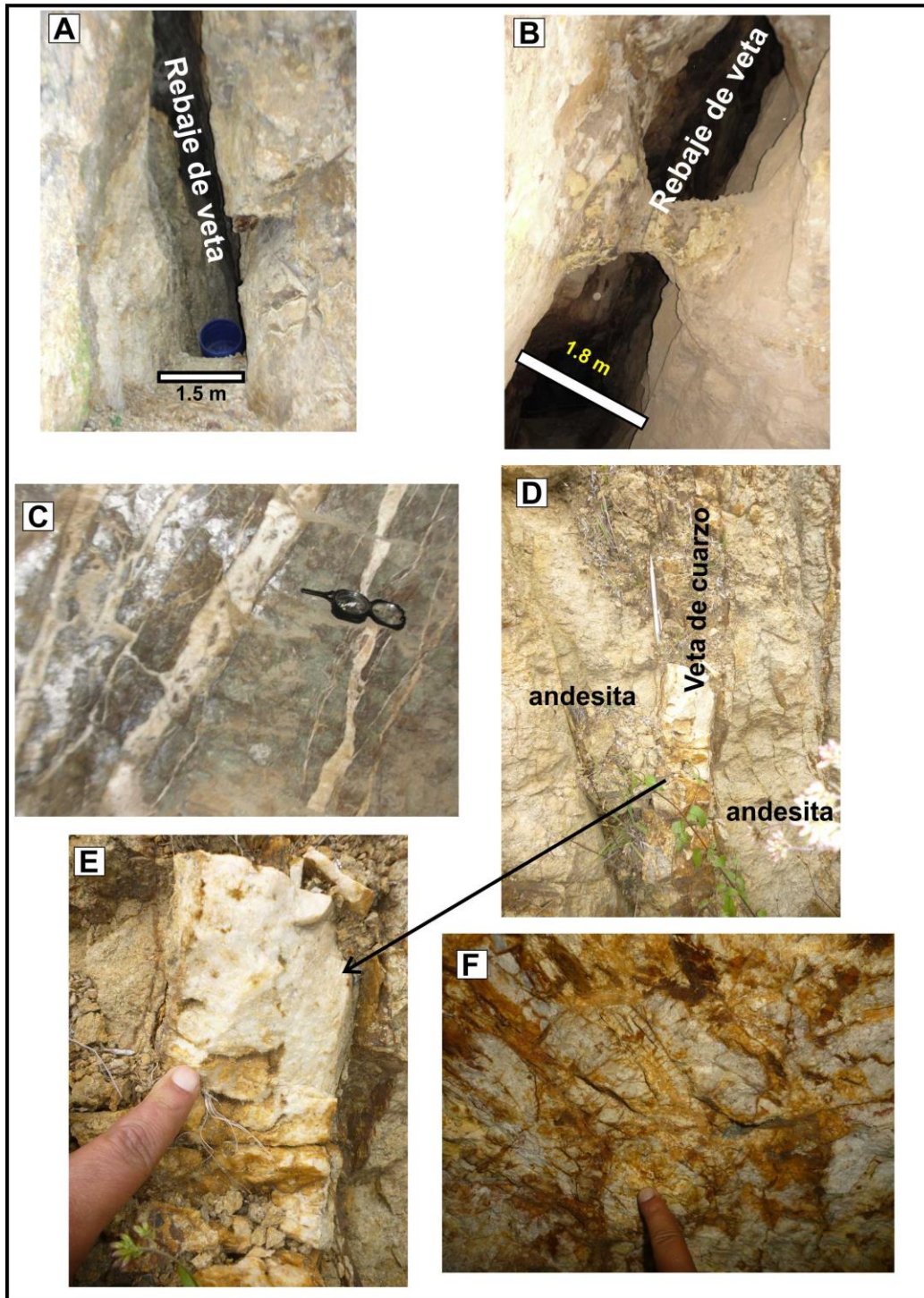


Figura 6.1. Tipos de estructuras en vetas epitermales en el área de estudio. A, rebaje de la veta Trinidad. B, rebaje de la veta La Cruz. C, vetas ramaleadas con texturas de cuarzo drúscico y estructura brechada en socavón La Cruz. D y E, veta de cuarzo drúscico y coloforme con limonitas indígenas encajonada en andesitas fracturadas, área de Santa Rosa. F, veta de cuarzo con estructura brechada y fracturada con jarosita y arcillas blancas de alteración; socavón de la obra La Esmeralda.

6.2 Alteraciones hidrotermales

La alteración hidrotermal en los yacimientos minerales se debe a la circulación de fluidos hidrotermales, ya sea agua caliente, vapor o gas, produciendo un cambio físico-químico en las rocas a través de las cuales circulan. Esta circulación involucra volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes que atraviesan rocas permeables debido a la presencia de fisuras o poros interconectados que enfocan las soluciones a un sitio de precipitación. Un sistema hidrotermal consta de dos componentes esenciales: una fuente de calor que proporciona la energía necesaria (magmática, gradiente geotérmico, decaimiento radiogénico, metamorfismo) y una fase fluida, que incluye soluciones derivadas de fluidos magmáticos / juveniles, fluidos metamórficos, aguas connatas o agua de mar.

6.3 Clasificación de las alteraciones hidrotermales.

Las alteraciones hidrotermales reflejan la interacción del fluido (comúnmente dominado por H_2O) con la roca, a temperaturas que varían de menos de 100° C a más de 700° C. La alteración es un rasgo ubicuo en y alrededor de los depósitos hidrotermales, que frecuentemente se dispone en halos mucho más grandes que los depósitos que encierran. En términos generales, la distribución y mineralogía de estas alteraciones se relaciona directamente al ambiente hidrotermal y, por consiguiente, al tipo de yacimiento mineral. La mineralogía, y en algunos ambientes la composición química de la alteración, aportan evidencias acerca de la proximidad de la mineralización o en el caso ideal, pueden definir un vector o vectores hacia el cuerpo.

6.4 Alteraciones relacionadas a la actividad magmática somera

Un gran número de enfoques se han utilizado para la clasificación de las alteraciones hidrotermales. Es patente que la terminología ha sido fuertemente influenciada por el ambiente de formación y por consecuencia, las clasificaciones tienden a reflejar tipos específicos de depósitos.

Por ejemplo, las clásicas alteraciones hipogénicas que se distribuyen en torno de los pórfidos cupríferos (Lowell y Guilbert, 1970, figura 6.2) o las alteraciones observadas en los yacimientos epitermales descritas por Hendenquist *et al.*, 2000 (figura 6.3).

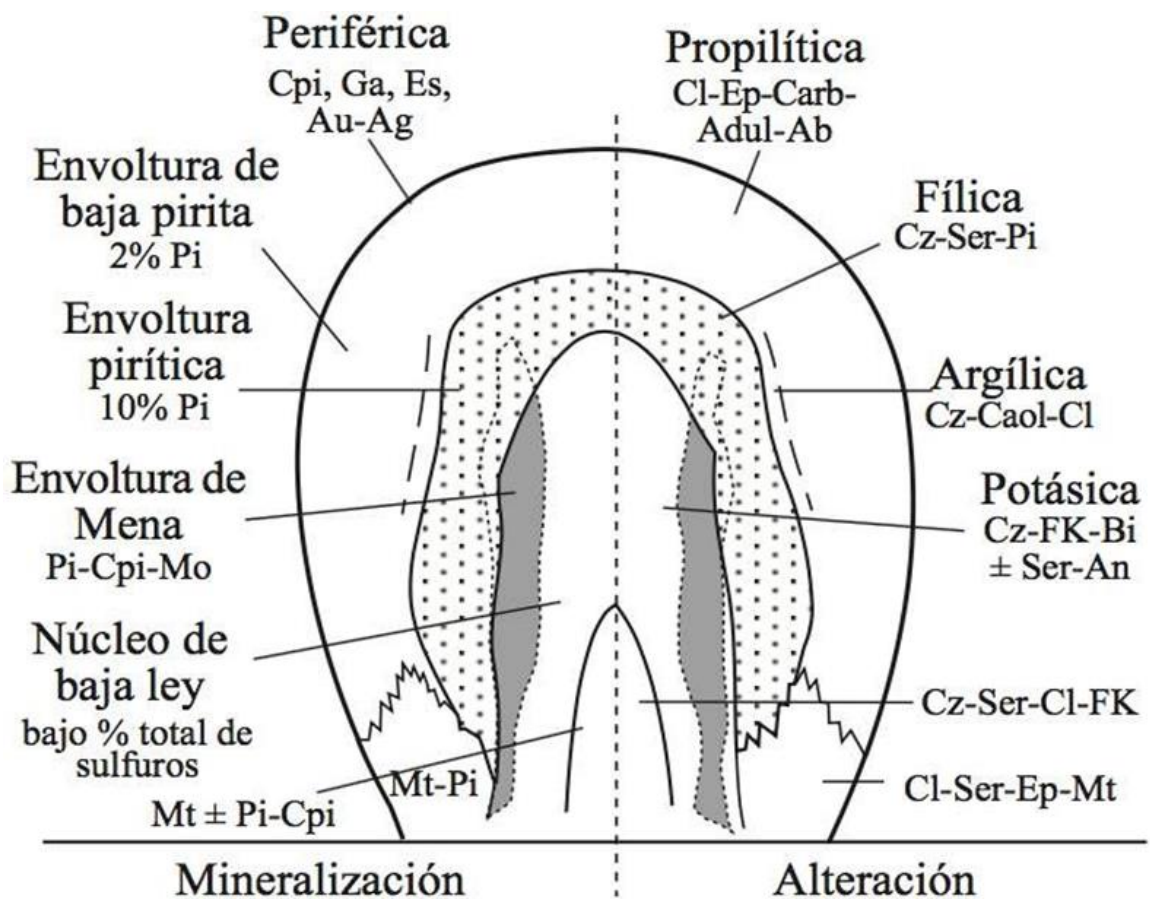


Figura 6.2- Modelo de Lowell y Guilbert (1970) para el depósito de San Manuel-Kalamazoo, Arizona, mostrando el zonamiento vertical y lateral de la alteración y la mineralización típico de los pórfidos de cobre.

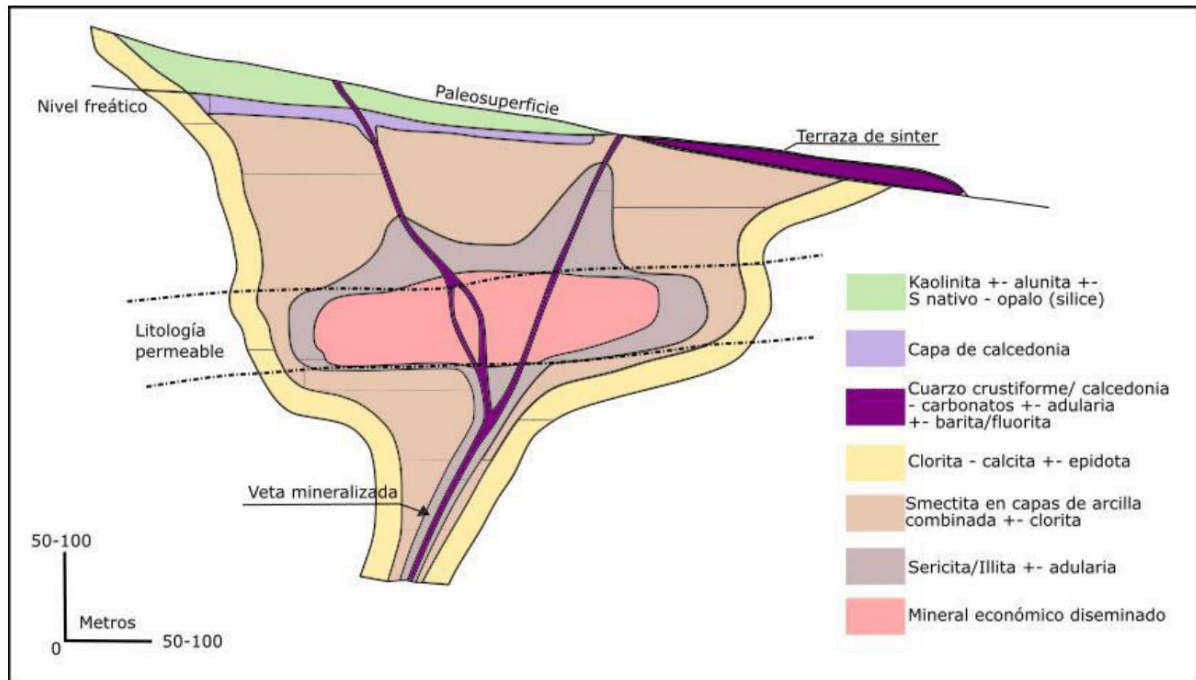


Figura 6.3- Sección esquemática de los patrones de alteración en sistemas de epitermales de baja sulfuración, (modificado de Hedenquist et al., 2000).

- **Potásica rica en biotita o de silicato de K o biotítica.**

Paragénesis: Biotita (flogopita)-feldespato potásico (ortoclasa)-magnetita, cuarzo, anhidrita, albita, actinolita, rutilo, apatita, sericita, clorita, epidota.

Ambiente de formación: Generalmente se encuentra en el núcleo de los depósitos porfídicos, particularmente aquellos hospedados por intrusiones más máficas, como dioritas, monzonitas o granodioritas, o bien, por rocas volcánicas y/o volcanoclásticas de naturaleza máfica a intermedia. Puede formar una gran zona de alteración periférica en las rocas encajonantes (sin feldespato potásico), más grande que las zonas externas de alteración propilítica.

- **Potásica o de silicato de K.**

Paragénesis: Feldespato potásico (ortoclasa o microclina), cuarzo, albita, moscovita, anhidrita, epidota.

Ambiente de formación: Se encuentra en el núcleo de los sistemas porfídicos, particularmente hospedada por intrusiones félsicas (granodiorita-cuarzomonzonita, granito, sienita).

- **Sódica o sódico-cálcica.**

Paragénesis: albita, actinolita, clinopiroxeno (diópsida), cuarzo, magnetita, titanita, clorita, epidota, escapolita.

Ambiente de formación: Ocurre con poca mineralización en las partes profundas y en algunos casos periférica, de algunos sistemas porfídicos y hospeda mineralización en depósitos porfídicos asociados con intrusiones alcalinas.

- **Fílica o sericitica.**

Paragénesis: Sericita (moscovita-illita), cuarzo, pirita, clorita, hematita, anhidrita.

Ambiente de formación: Forma con mucha frecuencia, un halo que bordea al núcleo de los depósitos porfídicos; hospeda substancial mineralización y puede estar sobreimpuesta a la alteración potásica temprana.

- **Argílica intermedia o alteración de sericita-clorita-minerales arcillosos (SCA) o simplemente argílica.**

Paragénesis: Sericita (illita-esmectita), clorita, caolinita (dickita), montmorillonita, calcita, epidota, pirita.

Ambiente de formación: Su distribución por lo general, manifiesta fuerte control estructural y está ampliamente sobreimpuesta a otros tipos de alteración (potásica) en numerosos sistemas porfídicos; sin embargo, las texturas originales son comúnmente preservadas. El término argílica es frecuentemente utilizado para describir alteración destructiva que presenta una mineralogía similar rica en arcillas y que ocurre en y alrededor de estructuras, en las partes superiores de los sistemas porfídicos y más comúnmente en los yacimientos epitermales de baja sulfuración.

- **Argílica avanzada.**

Paragénesis: Pirofilita, cuarzo, sericita, andalucita, diásporo, corundo, alunita, topacio, turmalina, dumortierita, pirita, hematita.

Ambiente de formación: Alteración intensa que frecuentemente ocurre en la parte superior de los sistemas porfídicos y presentes en los yacimientos epitermales de alta sulfuración. También se presenta alrededor de vetas ricas en piritita que cortan otros tipos de alteración.

- **Propilítica.**

Paragénesis: Clorita, epidota, albita, calcita, actinolita, sericita, minerales arcillosos, piritita. Ambiente de formación: Por lo general forma la zona de alteración más externa, en los niveles intermedios y profundos de los sistemas tipo pórfido. En algunos sistemas, esta alteración muestra zoneamiento mineralógico: rica en actinolita en la zona interna que es bordeada por una zona externa rica en epidota.

6.5 Alteraciones hidrotermales en el área de estudio

Las alteraciones hidrotermales que se presentan son silicificación, argilización, propilítica y clorítica. En ocasiones aparecía en sectores discretos y reemplazando a los feldespatos la sericita. Estas alteraciones se observaron dentro de estructuras de fracturas y fallas (figura 6.4).

La silicificación comprende a la presencia de sílice en forma de relleno de cavidades o como reemplazamiento de las paredes de la roca por la cual atravesó el fluido hidrotermal.

La argilización comprende minerales arcillosos que de acuerdo con la distribución de los minerales de alteración podrían ser esmectita y en algunas zonas la presencia de la mezcla illita-dickita. Es probable que en donde se presenten las arcillas hidrotermales se tenga la presencia de caolinita supergénica.

La alteración propilítica está definida en los bordes de las vetas-falla y tiene una amplia distribución en las rocas encajonantes. La alteración está definida por la presencia en la

matriz de la roca de clorita, epidota, pirita y calcita. Cuando aparecía esta alteración se presentan vetillas de calcita.

La cloritización es muy abundante y en ocasiones no se observa epidota, pero se ven vetillas de calcita con trazas de pirita en fracturas.

La silicificación y la argilización se observaron en los núcleos de las fallas en donde se presentan vetas con calcita, cuarzo y jarosita (figura 6.4). La silicificación y argilización denotan la presencia de vetas de cuarzo. La silicificación cuando se presenta está asociada con pirita diseminada en la roca encajonante que fue afectada por la alteración hidrotermal.

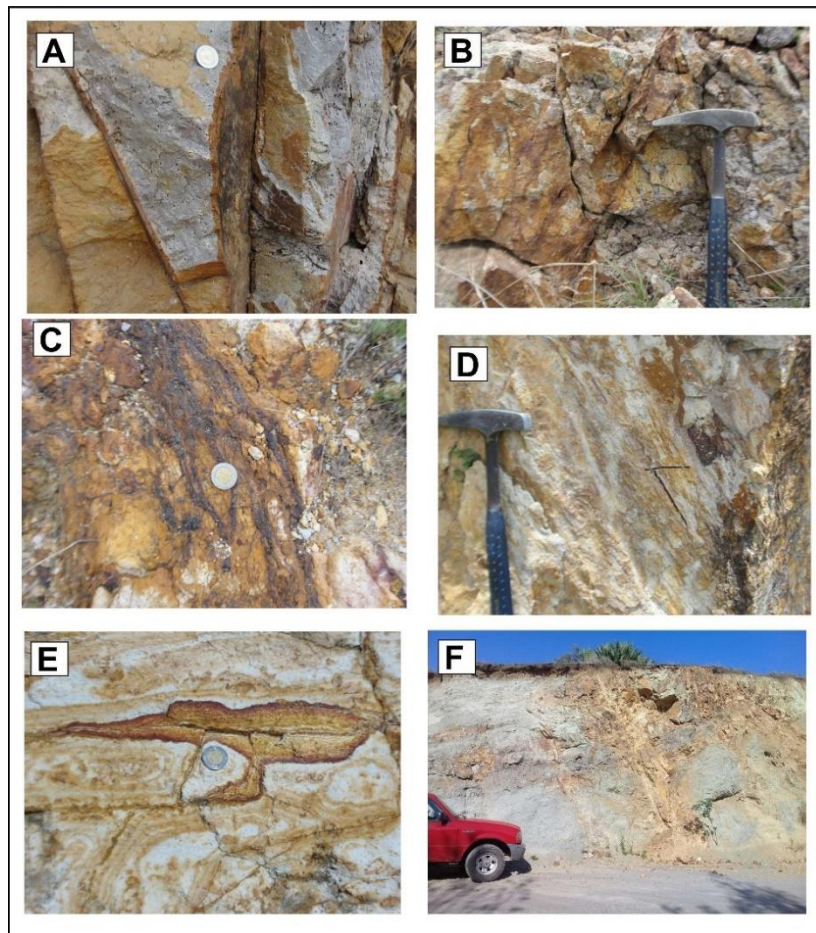


Figura 6.4. Tipos de alteraciones hidrotermales en el área de estudio. A, andesita silicificada al alto de la veta falla Capula-Arévalo con vetillas-fractura con jarosita y cuarzo. B, vetillas fractura con jarosita (pirita) y goethita supergénica. C, alteración argílica con sericita y vetillas de jarosita (derivada de pirita) en la veta-falla Reforma con dique riolítico. D, veta Reforma con alteración argílica y limonitas supergénicas. E, vetillas en stockwork de jarosita con texturas de lisigan de las limonitas en riodacítica con alteración argílica, en el área de la veta La Cruz. F, fallas y fracturas con alteración argílica con limonitas rodeadas de roca andesítica con alteración propilítica.

Capítulo 7

Discusión: Análisis estructural (deformación)

7.1 Análisis de orientación de fallas y fracturas

En el capítulo 5 se describieron los rasgos estructurales más sobresalientes observados en el campo, este capítulo presenta los estereogramas y rosetas de fallas (figura 7.1) y fracturas (figura 7.2) de una manera integrada por zonas mineras y empleando datos estructurales mostrados en las tablas del Anexo 1.

A partir de los resultados de orientaciones de fallas (figura 7.1) es posible observar que las fallas de la zona de estudio de este trabajo tienen cuatro direcciones como son E-W (WNW-ESE), NW-SE, NE-SW y N-S. Las fallas que predominan son las de orientación al NW-SE-y E-W. Las estructuras de falla concuerdan con la tendencia que se ha reportado en la carta geológica – minera de Pachuca (F14D81). Las fallas NE-SW también están presentes y son abundantes, aunque aparentemente en menor cantidad a las fallas E-W y las NW-SE, estas fallas son más frecuentes encontrarlas en las zonas mineras de Santa Rosa y Ernestina-Puerto del Oro lo que puede sugerir una relación con la mineralización ya que estas fracturas se presentan en donde se encuentran las principales obras mineras. Estas fallas NE-SW están subordinadas a las fallas de mayor longitud E-W y WNW-ESE lo que parecería como que las fallas NE-SW son una respuesta geométrica a la deformación principal de acuerdo con las orientaciones y sugiere un desplazamiento oblicuo de las fallas.

En cuanto a las fracturas presentan cinco grupos con base en sus orientaciones E-W, WNW-ESE, NW-SE, NE-SW y N-S. Estas orientaciones son similares a las fallas lo que sugiere una relación muy cercana de fallas y fracturas en la zona de estudio. Las que aparecen en mayor cantidad son los grupos E-W y WNW-ESE en los diagramas de rosetas (figura 7.2).

La presencia de cinco orientaciones de fallas y fracturas en el área de estudio sugiere la posible reactivación de antiguas fracturas pre-existentes y la presencia de varias generaciones de fracturas. En el distrito Minero de Pachuca-Real del Monte (zona de Real del Monte) aparecen las fallas y vetas-fallas WNW-ESE como las principales y las que presentan la mineralización y los diques ígneos de mayor longitud en afloramiento siguen estas orientaciones. En Real del Monte existen fallas N-S y NE-SW pero son subordinadas en orientación al mayor sistema WNW-ESE. En el área de estudio (Actopan, El Arenal, Santa Rosa) de este trabajo de tesis estas orientaciones también se presentan y está presente las orientaciones WNW-ESE así como las N-S y las NE-SW en esta parte se parece mucho a Real del Monte y Pachuca, y además estas orientaciones coinciden con la orientación WNW-ESE de la Sierra de Pachuca, sin embargo se notan orientaciones abundantes E-W y NW-SE que sugieren que puede haber otros eventos de deformación que generaron fracturas y fallas en la zona de este trabajo adicional a los eventos de Real del Monte y Pachuca.

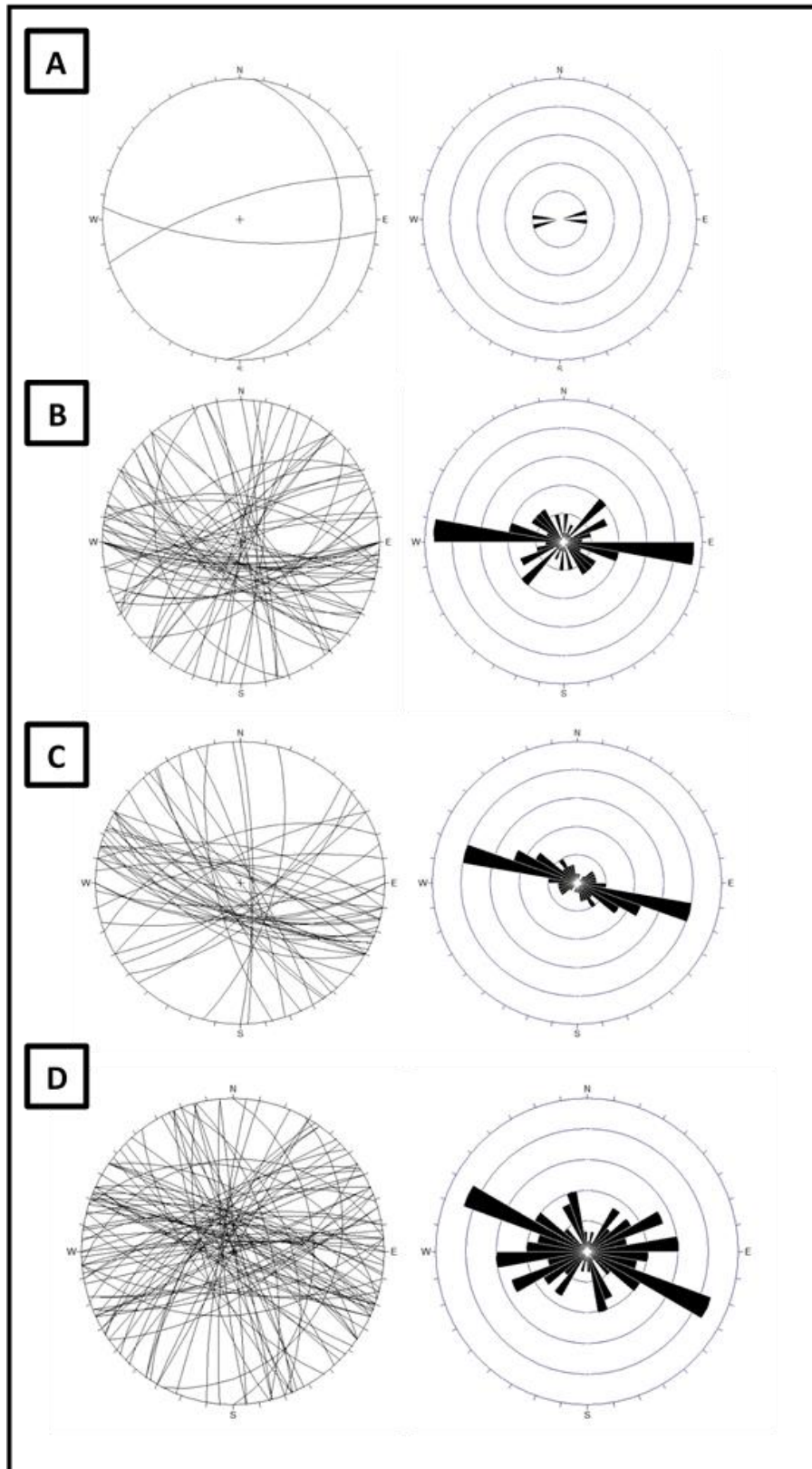


Figura 7.1 Estereogramas y rosetas de las fallas mapeadas en la zona de estudio. A, Zona minera de Santa Ana - Capula. B, Zona minera Santa Rosa. C, Zona minera de Santa Lucía – San José Tepenené. D, Zona minera Ernestina – Puerto del Oro.

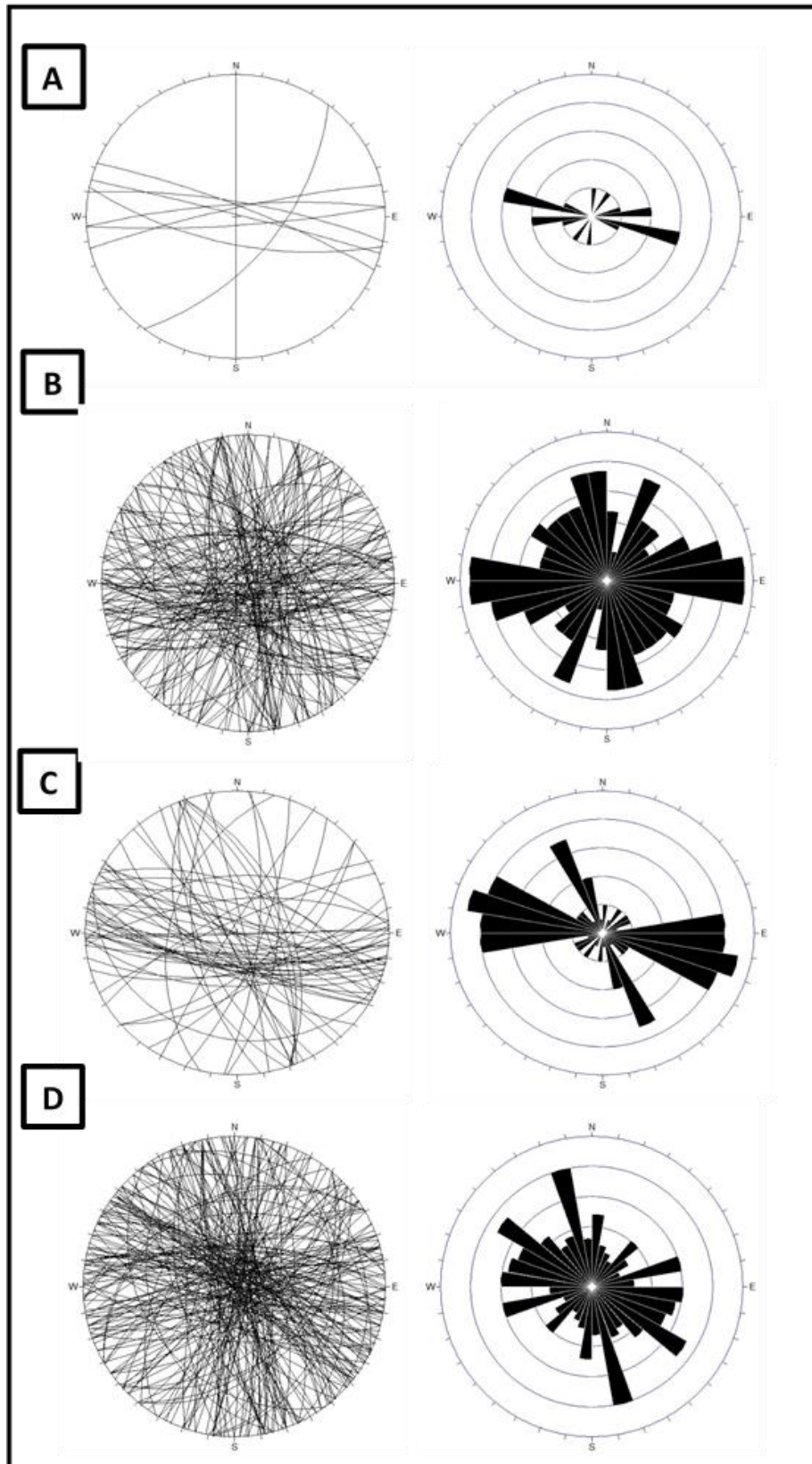


Figura 7.2 Estereogramas y rosetas de las fracturas mapeadas en la zona de estudio. A, Zona minera de Santa Ana - Capula. B, Zona minera Santa Rosa. C, Zona minera de Santa Lucía – San José Tepenené. D, Zona minera Ernestina – Puerto del Oro.

7.2 Análisis de Deformación

En este capítulo se presenta el análisis de la deformación referente a las direcciones de extensión principales con apoyo de estereogramas realizados en el software Faultkin con datos de fallas que resaltan las direcciones de extensión. Para este análisis los datos de las fallas se seleccionaron cuidando su cercanía para que el comportamiento no fuera afectado por datos de fallas más lejanas por lo que veremos disminuida la cantidad de fallas graficadas por estereograma. Las fallas de Santa Ana – Capula se excluyen de este análisis por tener datos sin estrías.

Fallas Santa Rosa

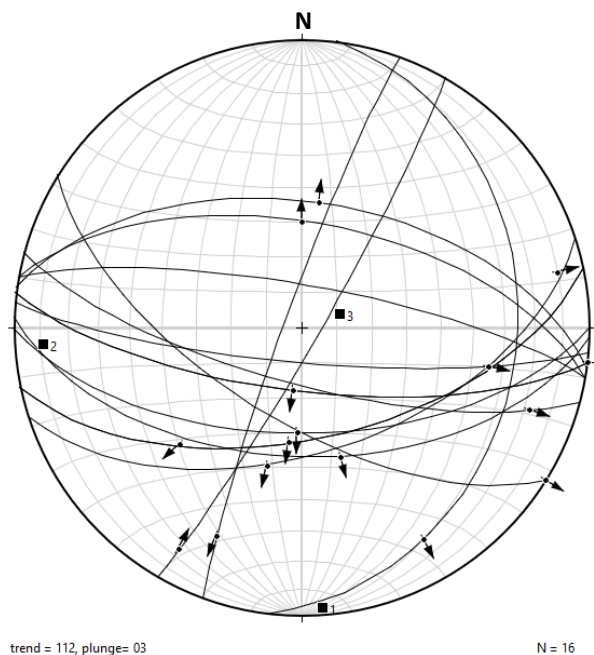


Figura 7.3 Estereograma de deformación para la Zona minera de Santa Rosa.

De la figura 7.3, en la zona de Santa Rosa se puede ver que la dirección de extensión principal para las fallas E-W y NW-SE son Norte-Sur. Las Fallas NW-SE se comportaron como fallas oblicuas con cinemática de fallas normales. Las fallas NE-SW se comportaron como fallas laterales, lo que es concordante con una extensión N-S principal.

En las fallas E-W y algunas WNW-ESE existe otro movimiento de fallas laterales que no es compatible con la dirección de extensión N-S y sugiere que existió otra dirección de

extensión WNW-ESE que provocó que las fallas E-W y WNW-ESE tuvieran una cinemática lateral y oblicua en su movimiento.

Fallas Santa Lucía – San José Tepeñené.

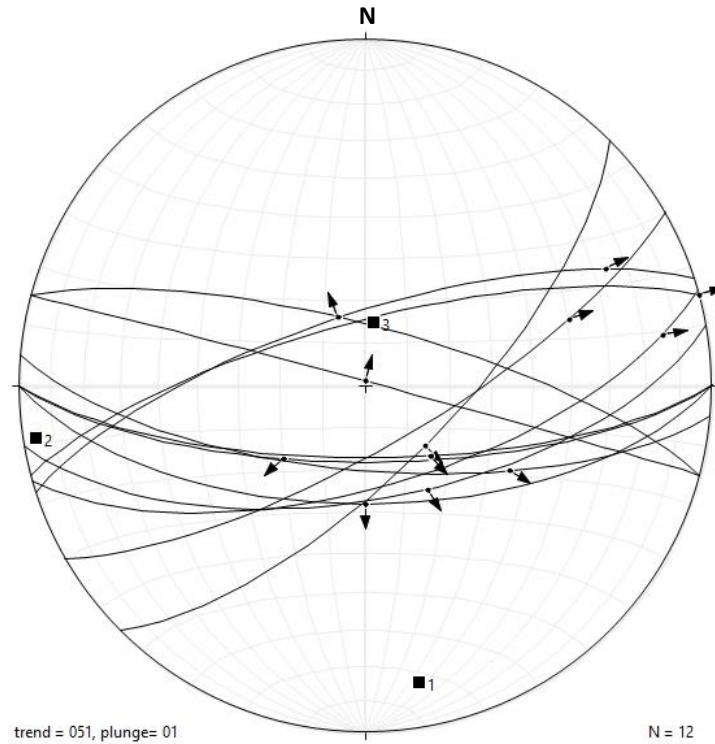


Figura 7.4 Estereograma de fallas que muestra direcciones de extensión principal para las fallas de la zona de Santa Lucía-San José Tepeñené.

A partir del resultado de la figura 7.4 las fallas de la zona de Santa Lucía-San José Tepeñené la dirección de extensión principal es NW-SE y NE-SW. La extensión NW-SE está presente en las fallas E-W, WNW-ESE y algunas NE-SW. Otro evento de extensión NE-SW es registrado donde las fallas tienen direcciones NE-SW. Para el evento de extensión NW-SE las fallas que se formaron son de tipo normal y en el evento de extensión NE-SW son fallas laterales y oblicuas.

Debido a la que no existe una compatibilidad cinemática entre las direcciones de extensión NW-SE y las NE-SW existen fallas que son de episodios de deformación distintos.

Fallas Ernestina – Puerto del Oro

Norte

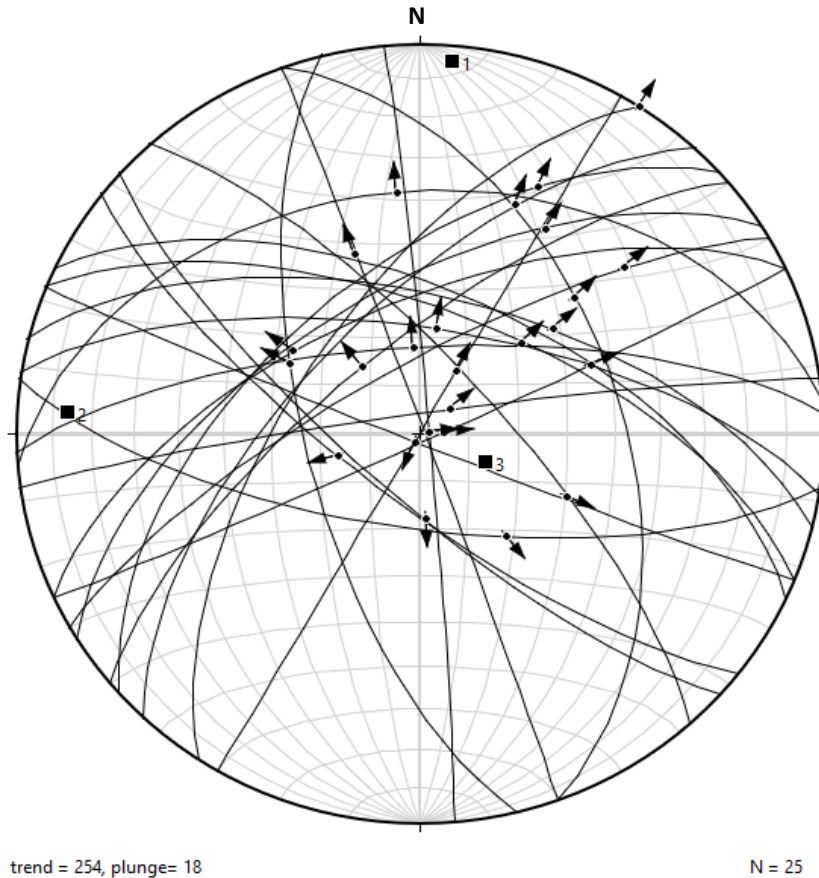


Figura 7.5 Estereograma de fallas que muestra direcciones de extensión principal para las fallas de la zona mineralizada Ernestina-Puerto del Oro.

En la zona mineralizada de Ernestina-Puerto del Oro, las fallas y vetas-falla de esta zona como se muestra en la figura 7.5 existen fallas que son compatibles cinemáticamente con una dirección de extensión Norte-Sur, así como fallas también compatibles con dirección de extensión NW-SE y otras NE-SW. En la dirección de extensión NW-SE existen fallas que se comportaron como fallas oblicuas y laterales y sugiere la existencia de fracturas pre-existentes un poco antes de que ocurriera la extensión NW-SE.

En la dirección de extensión N-S también aparecen fallas normales y laterales, las fallas normales tienen orientaciones E-W y WNW-ESE, y las fallas N-S se comportan como fallas laterales, esto sugiere también la presencia de fracturas pre-existentes antes de la extensión N-S.

Al considerar en toda la zona de estudio los resultados de las orientaciones y las direcciones de extensión. En cuanto a las direcciones de extensión, se puede decir que existen tres direcciones de extensión principales que son NW-SE, N-S y NE-SW. Estas direcciones de extensión formaron fallas y fracturas nuevas, pero también reactivaron a fracturas pre-existentes ya sea como fallas laterales, normales o fallas oblicuas. Las direcciones de extensión NW-SE y NE-SW podrían estar relacionadas a una deformación tridimensional, pero esto aún no es concluyente, ya que faltaría un mayor análisis de la deformación por ejemplo utilizando esfuerzos y otras relaciones geológico-estructurales de campo que en este trabajo no se realizó.

Las direcciones de extensión NE-SW y la presencia de fallas laterales E-W puede sugerir que existe un movimiento trans-tensional derecho, es decir un fallamiento lateral derecho y que sería compatible la presencia de fallas normales NE-SW y fallas laterales E-W, así como la presencia de fallas oblicuas.

7.3 Controles estructurales

En este trabajo con base en los resultados geológico-estructurales y de sus relaciones con las vetas epitermales y alteraciones hidrotermales asociadas se proponen tres eventos de deformación (E1, E2 y E3) basados en las extensiones principales y cinemática (figura 7.5). Para que se hayan emplazado los diques y domos riolíticos y riodacíticos de la unidad San José debió haber existido fracturas o fallas pre-existentes ya que de acuerdo a los resultados de la deformación existieron fracturas pre-existentes antes del evento del emplazamiento de estos diques y domos. Este sería un evento de deformación anterior (E1) al evento trans-tensional propuesto para la mineralización (E2).

Durante este evento extensional de deformación E1 se emplazaron los centros volcánicos andesíticos que dieron origen a la Formación Vizcaína. La dirección de extensión principal para este evento y tomando en consideración a la orientación de la Sierra de Pachuca

WNW-ESE pudo haber sido NNE-SSW formando fallas normales. Este evento E1 provocó la rotación de las capas volcanoclásticas andesíticas y derrames de la Formación Vizcaína.

Las vetas de cuarzo que contienen la mineralización están relacionadas espacialmente con los diques riolíticos y riodacíticos de la unidad San José ya que presentan orientaciones WNW-ESE y E-W. Las orientaciones de los diques y los domos riodacíticos sugieren direcciones de extensión NNE-SSW, NE-SW y N-S. Entonces se puede relacionar la extensión N-S, NNE-SSW o NE-SW con el emplazamiento de los diques y domos riolíticos de la unidad San José, así como la presencia de fallas oblicuas y laterales E-W. Esto implicaría un evento de trans-tensión lateral derecho (E2) que pudo haber originado a los domos riodacíticos y la mineralización en la zona de estudio.

Los fluidos hidrotermales con Oro y Plata se formaron posteriormente al emplazamiento de los diques y domos riodacíticos y riolíticos, pero fueron controlados por las mismas fallas y fracturas del evento del evento trans-tensional E2.

Existió otro evento extensional N-S que formó diques andesítico-basálticos y reactivó las fallas y fracturas de los anteriores eventos de extensión (E1 y E2). Este evento es más evidente hacia el Puerto La Palma en el límite Sur del área de estudio. Este evento está relacionado con la formación de conos cineríticos que extruyeron derrames andesíticos y basálticos y con vulcanismo fisural entre Santa María y San Juan Solís, y que corresponde a la Formación San Cristóbal. Este evento representa a la actual Faja Volcánica Transmexicana.

| Edad | Evento de deformación (extensión) | Eventos geológicos e hidrotermales | Unidad geológica | Descripción |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cuaternario | E3 | Fallas extensionales normales. Extensión N-S. | Unidad Santa María | Conos cineríticos, depósitos piroclásticos basálticos |
| Mioceno-Plioceno | E2 | <p>Fallamiento trans-tensional</p> <p>domos</p> | Vetas epitermales oro y plata | Vetas epitermales de cuarzo con oro y plata emplazadas en fracturas Riedel. |
| | | | Unidad San José | Emplazamiento de criptodomas, domos, diques riolíticos y riolacíticos. |
| | | | Formación Zumate | Emplazamiento de flujos volcanoclásticos y rocas piroclásticas dacíticas y andesíticas. |
| Oligoceno-Mioceno | E1 | <p>fallamiento extensional</p> | Formación Vizcaína | Vulcanismo fisural y dómico con diques andesítico-dacítico con flujos volcanoclásticos, piroclásticos y derrames lávicos andesíticos. |

Figura 7.6 Esquema que muestra las relaciones entre los eventos de extensión, la mineralización y la formación de unidades geológicas para el área de estudio.

7.4 Modelo conceptual

En este trabajo se propone que la mineralización de oro y plata para la zona de estudio entre Actopan y Santa Rosa fue controlada por fallas y fracturas formadas durante un evento extensional E1 y un evento trans-tensional (E2). Los diques y domos riolíticos y riolacíticos de la unidad San José que es equivalente a la Formación El Cerezo para la zona de Real del Monte fueron necesarios en la mineralización ya que fueron generadores de fluidos hidrotermales y proporcionaron el calor térmico necesario en un sistema epitermal (Figura 7.6). La falta de continuidad de los emplazamientos de magma riolítico a lo largo del rumbo de las fallas y fracturas y en la superficie sugiere un emplazamiento vertical de las intrusiones y que pudo haber controlado la dirección de un fluido hidrotermal ascendente vertical, así como la geometría de las celdas convectivas de calor. Esto indica también que existen criptodomas riolacíticos y riolíticos que controlaron la distribución de la mineralización en la Sierra de Pachuca.

Las alteraciones hidrotermales en su distribución espacial estuvieron controladas por un fluido hidrotermal que fue canalizado a lo largo de las zonas de mayor permeabilidad como las fallas y fracturas de un primer evento extensional E1 que controló el vulcanismo en la Sierra de Pachuca y también hubo controles estratigráficos en el fluido hidrotermal a lo largo de contactos litológicos entre rocas volcánicas y derrames lávicos dentro de la Formación Vizcaína. La amplia distribución de alteración clorítica y propilítica se puede explicar por el grado intenso de fracturamiento y que el magma riolítico y riolítico tuvo favorables condiciones de permeabilidad de manera ascendente vertical y con cuerpos ígneos subvolcánicos estacionados no profundos y a veces ocultos como criptodomas encajonados en andesitas de la Formación Vizcaína.

La presencia de vetas epitermales angostas en su espesor en el área de estudio puede explicarse porque el fallamiento estuvo relacionado a un evento trans-tensional (E2) con presencia de fallas laterales y oblicuas, y no meramente extensional con fallas normales.

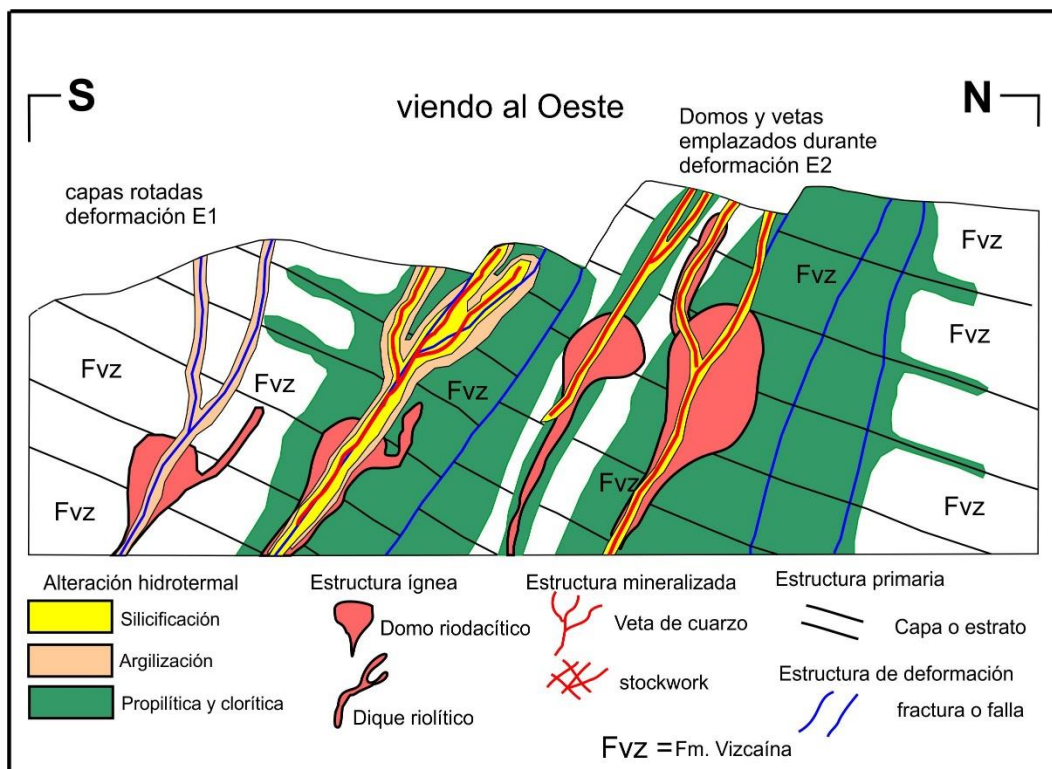


Figura 7.7 Esquema que muestra un modelo conceptual propuesto para la integración de litología, domos ígneos, mineralización y estructuras de deformación para el área de estudio.

Conclusiones

En este trabajo se elaboró la cartografía geológica y geológico estructural del sector poniente de la Sierra de Pachuca, área mineralizada de Actopan, San José Tepenené, Santa Rosa y Puerto La Palma. Se caracterizó geológicamente a la Formación Vizcaína, Unidad San José, Formación El Zumate y la unidad Santa María.

Se caracterizó estructuralmente la zona de estudio en sus fracturas, fallas y vetas-falla determinando varias direcciones de extensión N-S, NW-SE NE-SW. Se analizó estas deformaciones determinando que existieron tres eventos de extensión principales denominados E1, E2, y E3. El evento de deformación E1 controló la distribución de los centros de emisión volcánica de la Sierra de Pachuca en este sector de estudio de esta tesis y por los cuales se emplazó las rocas de la Formación Vizcaína. El evento E2 fue un evento trans-tensional que implicó fallas laterales y normales formadas al mismo tiempo y que controlaron la distribución espacial de los diques y domos riodacíticos y riolíticos de la unidad San José, así como la formación de las vetas epitermales y la mayoría de la distribución de las alteraciones hidrotermales. El evento de deformación (extensión) E3 fue un evento de extensión N-S que controló diques andesíticos y basálticos y conos cineríticos de la Faja Volcánica Transmexicana, esto más evidente en Puerto La Palma.

Los domos riolíticos y riodacíticos de la unidad San José se emplazaron verticalmente y algunos domos no extruyeron se mantuvieron ocultos debajo de la superficie como criptodomas. Estos se pueden considerar guías de mineralización hacia partes profundas de la Sierra de Pachuca y relacionados a la mineralización epitermal de Oro y Plata.

La geometría de fallas y fracturas del evento trans-tensional (evento E2) se puede considerar como una guía en la exploración mineral al tener en cuenta el comportamiento cinemático de las fallas que se formaron y que forma estructuras tipo Riedel en sus fracturas.

Referencias

ALANIZ-ÁLVAREZ, S. A., NIETO-SAMANIEGO, Á. F., OROZCO-ESQUIVEL, M. T., VASALLO-MORALES, L. F., Y XU, S. S., 2002, EL SISTEMA DE FALLAS TAXCO-SAN MIGUEL DE ALLENDE: IMPLICACIONES EN LA DEFORMACIÓN POST-EOCÉNICA DEL CENTRO DE MÉXICO: BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA, 55(1), 12-29.

AZPEITIA, C., 2007, MINERALES DE LOS DISTRITOS MINEROS METÁLICOS ZIMAPÁN, PACHUCA – REAL DEL MONTE, MOLANGO Y SU APLICACIÓN DIDÁCTICA (TESIS DE LICENCIATURA). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, MÉXICO.

BAKER, K.M., PETCOVIC, H., WISNIEWSKA, M., & LIBARKIN, J., 2012, SPATIAL SIGNATURES OF MAPPING EXPERTISE AMONG FIELD GEOLOGISTS. CARTOGRAPHY AND GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 39(3): P. 119-132.

BASTIN, E.S., 1948, MINERAL RELATIONSHIPS IN THE ORES OF PACHUCA AND REAL DEL MONTE , MEXICO: ECONOMIC GEOLOGY, v.43, No.1, P. 53-65.

BUCHANAN, L.J., 1981, PRECIOUS METAL DEPOSITS ASSOCIATED WITH VOLCANIC ENVIRONMENTS IN THE SOUTHWEST: ARIZONA GEOLOGICAL SOCIETY DIGEST, 14, 237–262.

CAMPRUBÍ, A., 2018, UNA EXCEPCIONAL ACUMULACIÓN DE PLATA. LOS YACIMIENTOS EPITERMALES DE PACHUCA-REAL DEL MONTE, HIDALGO EN GUÍA DE CAMPO DEL GEOPARQUE DE LA COMARCA MINERA, EDITOR CANET MIGUEL, CARLES. INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM.

CAMPRUBÍ, A., ALBINSON, T., 2006, DEPÓSITOS EPITERMALES EN MÉXICO: ACTUALIZACIÓN DE SU CONOCIMIENTO Y RECLASIFICACIÓN EMPÍRICA. BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA. VOLUMEN CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO. REVISIÓN DE ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE DEPÓSITOS MINERALES DE MÉXICO. TOMO LVIII, NÚM. 1. P. 27-81.

DE LÉON-CHÁVEZ, J.L., 1982, INFORME GEOLÓGICO DE LA VISITA PRELIMINAR REALIZADA AL LOTE MINERO “LA PRECIOSA”, MPIO. EL ARENAL, EDO. DE HIDALGO. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. Pp.11.

DE LOS SANTOS-MONTAÑO, J., 1996, INFORME DE GEOLOGÍA A SEMIDETALLE-DETALLE, REALIZADA EN EL PROYECTO DE “SANTA ANA”, LOCALIZADO DENTRO DE LA ZONA DE RESERVA MINERA NACIONAL “PACHUCA TRES”, MUNICIPIO EL ARENAL, ESTADO DE HIDALGO. INFORME TÉCNICO, CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. Pp.35.

DUEÑAS-GARCÍA, J.C., 1989, INFORME DE ACTIVIDADES REALIZADAS EN CONTRATO “SAMARÍA” Y VISITAS DE RECONOCIMIENTO DURANTE 1989. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES.

EDWARDS, J. D., 1955, STUDIES OF SOME EARLY TERTIARY RED CONGLOMERATES OF CENTRAL MÉXICO. U. S. GEOLOGICAL SURVEY, PROFESSIONAL PAPER 264-H, p. 153-185.

FRIES, CARL, JR., 1960, GEOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS Y DE PARTES ADYACENTES DE MÉXICO Y GUERRERO, REGIÓN CENTRAL MERIDIONAL DE MÉXICO. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, BOL. 60, 236 p.

GARCÍA-CASTRO, P., 1987, VISITA DE RECONOCIMIENTO FUNDOS “SAMARIA” Y “AMPLIACIÓN SAMARIA”, MUNICIPIO DE EL ARENAL, HGO. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. Pp.14.

GARCÍA-CASTRO, P., SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, A., ÁLVAREZ-SALINAS, E., Y DUEÑAS-GARCÍA, J.C., 1988(B), INFORME TÉCNICO DE EXPLORACIÓN MINERA A SEMIDETALLE-DETALLE DEL PROYECTO SANTA LUCÍA TEPENENÉ. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. RESIDENCIA HIDALGO. Pp. 39.

GARCÍA-CASTRO, P., SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, A., Y DUEÑAS-GARCÍA, J.C., 1988(A), INFORME GEOLÓGICO REGIONAL DEL PROYECTO SANTA LUCÍA TEPENENÉ. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. Pp. 19.

GARCÍA-CASTRO, P., SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, A., Y FRIAS-GONZÁLEZ, M.A., 1988, INFORME GEOLÓGICO REGIONAL DEL PROYECTO SANTA LUCÍA TEPENENÉ. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. Pp. 34.

GEYNE, A.R., FRIES, C., JR., SEGERSTROM, K., BLACK, R.F., & WILSON, I.F., 1963, GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES DEL DISTRITO DE PACHUCA-REAL DEL MONTE, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO: CONSEJO DE RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES.

GÓMEZ-TUENA, A., OROZCO-ESQUIVEL, M. T., Y FERRARI, L., 2005, PETROGÉNESIS DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA: BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA, VOLUMEN CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO, 57 (3). P. 227-283.

GONZÁLEZ-GALLARDO, J.A., PATIÑO-HIDALGO, J.A., RODRIGUEZ-CASTRO, D., SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, A., Y VALVERDE-RAMÍREZ, J., 1987, INFORME SOBRE LAS ALTERACIONES EXISTENTES EN LAS INMEDIACIONES DE LA MINA “LA TRINIDAD” PROYECTO SANTA LUCÍA TEPENENÉ. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. RESIDENCIA HIDALGO. Pp. 23.

GONZÁLEZ-PEÑA, O.A., 2010, CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DEPÓSITOS EPITERMALES EN EL NOROESTE DE MÉXICO, UN ANÁLISIS Y COMPARACIÓN (TESIS DE LICENCIATURA). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SONORA. PP. 25.

HEDENQUIST, JEFFREY., ARRIBAS, ANTONIO., & GONZALEZ-URIEN, E., 2000, EXPLORATION FOR EPITHERMAL GOLD DEPOSITS. REVIEWS IN ECONOMIC GEOLOGY, V 13, P. 245-277.

JICA, 1980, REPORT ON GEOLOGICAL SURVEY OF THE PACHUCA-ZIMAPÁN AREA, CENTRAL MEXICO: FOTOGEOLOGICAL INTERPRETATION GEOLOGICAL SURVEY (PHASE L). METAL MINING AGENCY OF JAPAN-CONSEJO DE RECURSOS MINERALES, MÉXICO, 109 P., 15 ANEXOS, 4 MAPAS.

LOWELL, J. D., AND GUILBERT, J. M., 1970, LATERAL AND VERTICAL ALTERATION-MINERALIZATION ZONING IN PORPHYRY COPPER ORE DEPOSITS: ECONOMIC GEOLOGY, V. 65, PP. 373-408.

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 VEIN MINERALIZATION. ECONOMIC GEOLOGY, V.87, P. 1635-1637.

OROZCO-SÁNCHEZ, M., 1979, INFORME DE LA VISITA DE RECONOCIMIENTO AL LOTE MINERO DE SAMARIA, MPIO. EL ARENAL, EDO. DE HIDALGO. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. RESIDENCIA HIDALGO. PP. 4.

OVIDO-GÁMEZ, B., HERNÁNDEZ-BADILLO, M.A., 2012. MINA LA DIFICULTAD. MUSEO DE SITIO Y CENTRO DE INTERPRETACIÓN. ARCHIVO HISTÓRICO Y MUSEO DE MINERÍA A.C. PP. 203.

RÍO-TORRES, M., 2009, DISTRITO PACHUCA-REAL DEL MONTE, ESTADO DE HIDALGO. COMPAÑÍA REAL DEL MONTE Y PACHUCA EN CLARK, K.F., SALAS-PIZÁ, G.A., CUBILLAS-ESTRADA, R., 2009, GEOLOGÍA ECONÓMICA DE MÉXICO. SEGUNDA EDICIÓN 2009. ASOCIACIÓN DE INGENIEROS DE MINAS, METALURGISTAS Y GEÓLOGOS DE MÉXICO, A.C., Y SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. P. 667-673.

SÁNCHEZ-ROJAS, L.E., ARREDONDO-MENDOZA, J.A., CARDOSO-VÁZQUEZ, E.A., 1998, CARTA GEOLÓGICO-MINERA ESCALA 1:50 000, CLAVE PACHUCA F14D81. SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. SEGUNDA EDICIÓN.

SEGERSTROM, K., 1961, GEOLOGÍA DEL SUROESTE DEL ESTADO DE HIDALGO Y DEL NOROESTE DEL ESTADO DE MÉXICO: BOL. ASOC. MEX. DE GEOL. PETROL., XIII, 3 Y 4.

SIMONS F. MAPES E., 1957, GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES DEL DISTRITO MINERO DE ZIMAPÁN, HGO. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE RECURSOS MINERALES. BOL. 40, 270 P.

THORNBURG, C.L., 1952, SURFACE EXPRESSION OF VEINS IN THE PACHUCA SILVER DISTRICT OF MEXICO: MINING ENGINEERING, JUNE, P. 594-600.

VALVERDE-RAMÍREZ, J., ALBA-SOLÍS, L., GUERCA-MEZA, R., SALDAÑA-SAUCEDO, GUTBERTO., MENDOZA-URREA, J.F., 1977. PROGRAMA DE EXPLORACIÓN ÁREA SANTA LUCÍA (TEPENENÉ) MUNICIPIO DE EL ARENAL, HGO. INFORME TÉCNICO. CONSEJO DE RECURSOS MINERALES. SUBGERENCIA ZONA CENTRO. RESIDENCIA HIDALGO. Pp. 41.

WISSER, E., 1951, TECTONIC ANALYSIS OF A MINING DISTRICT: PACHUCA, MEXICO: ECONOMIC GEOLOGY, v.46, No. 5, P. 459-477.

10. Anexos

Anexo 1 Datos utilizados en estereogramas y rosetas (Fallas, vetas, fracturas y diques).

Zona minera Santa Ana-Capula

Fallas

Tabla A1. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 72 | 185 | 2,236,420 | 516,750 |
| 2 | 17 | 96 | 2,235,132 | 518,132 |
| 3 | 73 | 342 | 2,236,086 | 518,113 |

Vetas

Tabla B1. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 71 | 200 | 2,236,180 | 517,810 |
| 2 | 65 | 190 | 2,236,180 | 517,810 |
| 3 | 70 | 205 | 2,236,420 | 518,390 |
| 4 | 74 | 42 | 2,235,132 | 518,132 |
| 5 | 73 | 342 | 2,236,086 | 518,113 |
| 6 | 87 | 342 | 2,236,039 | 518,125 |

Fracturas

Tabla C1. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 90 | 270 | 2,235,132 | 518,132 |
| 2 | 83 | 347 | 2,235,132 | 518,132 |
| 3 | 88 | 15 | 2,236,066 | 518,120 |
| 4 | 83 | 176 | 2,236,066 | 518,120 |
| 5 | 80 | 356 | 2,236,066 | 518,120 |
| 6 | 81 | 22 | 2,236,066 | 518,120 |
| 7 | 68 | 192 | 2,236,066 | 518,120 |
| 8 | 58 | 128 | 2,236,039 | 518,125 |
| 9 | 78 | 10 | 2,236,039 | 518,125 |

Diques

Tabla D1. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Ana-Capula

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 68 | 20 | 2,236,066 | 518,120 |
| 2 | 69 | 346 | 2,236,066 | 518,120 |
| 3 | 61 | 195 | 2,235,954 | 518,093 |

Zona Minera de Santa Lucía - San José Tepeñené

Fallas

Tabla A2. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 75 | 245 | 2,235,963 | 515,809 | 25 | 74 | 210 | 2,236,434 | 513,904 |
| 2 | 62 | 180 | 2,235,974 | 515,965 | 26 | 82 | 228 | 2,236,434 | 513,904 |
| 3 | 70 | 330 | 2,235,913 | 515,966 | 27 | 65 | 190 | 2,236,434 | 513,904 |
| 4 | 70 | 135 | 2,235,644 | 515,914 | 28 | 65 | 194 | 2,236,434 | 513,904 |
| 5 | 66 | 164 | 2,235,644 | 515,914 | 29 | 70 | 235 | 2,236,426 | 513,859 |
| 6 | 76 | 15 | 2,235,644 | 515,914 | 30 | 72 | 234 | 2,236,426 | 513,859 |
| 7 | 75 | 150 | 2,235,503 | 515,688 | 31 | 66 | 220 | 2,236,426 | 513,859 |
| 8 | 81 | 72 | 2,236,236 | 515,417 | 32 | 60 | 190 | 2,236,426 | 513,859 |
| 9 | 80 | 90 | 2,236,236 | 515,417 | 33 | 60 | 190 | 2,236,426 | 513,859 |
| 10 | 60 | 140 | 2,236,371 | 515,074 | 34 | 60 | 190 | 2,236,426 | 513,859 |
| 11 | 62 | 210 | 2,236,371 | 515,074 | 35 | 80 | 60 | 2,236,295 | 513,616 |
| 12 | 65 | 195 | 2,236,450 | 514,816 | 36 | 90 | 51 | 2,236,295 | 513,616 |
| 13 | 82 | 87 | 2,236,450 | 514,816 | 37 | 63 | 105 | 2,236,344 | 513,540 |
| 14 | 70 | 257 | 2,236,447 | 514,778 | 38 | 60 | 180 | 2,236,344 | 513,540 |
| 15 | 59 | 200 | 2,236,470 | 514,659 | 39 | 72 | 177 | 2,236,344 | 513,540 |
| 16 | 67 | 205 | 2,236,470 | 514,659 | 40 | 65 | 202 | 2,236,344 | 513,540 |
| 17 | 52 | 340 | 2,236,470 | 514,659 | 41 | 72 | 350 | 2,236,235 | 513,583 |
| 18 | 61 | 10 | 2,236,575 | 514,234 | 42 | 74 | 145 | 2,236,100 | 513,572 |
| 19 | 75 | 365 | 2,236,575 | 514,234 | 43 | 48 | 210 | 2,236,148 | 513,352 |
| 20 | 66 | 205 | 2,236,428 | 514,042 | 44 | 84 | 15 | 2,236,401 | 513,388 |
| 21 | 53 | 198 | 2,236,428 | 514,042 | 45 | 84 | 22 | 2,236,401 | 513,388 |
| 22 | 53 | 198 | 2,236,428 | 514,042 | 46 | 82 | 23 | 2,236,401 | 513,388 |
| 23 | 75 | 208 | 2,236,434 | 513,904 | 47 | 78 | 30 | 2,236,401 | 513,388 |
| 24 | 78 | 210 | 2,236,434 | 513,904 | 48 | 84 | 190 | 2,236,401 | 513,388 |

Vetas

Tabla B2. Datos de veta para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepeñené.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 85 | 18 | 2,236,401 | 513,388 |

Fracturas

Tabla C2. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepenéné.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 61 | 192 | 2,236,089 | 515,409 | 32 | 64 | 190 | 2,236,470 | 514,659 |
| 2 | 65 | 177 | 2,236,089 | 515,409 | 33 | 63 | 189 | 2,236,470 | 514,659 |
| 3 | 56 | 197 | 2,236,089 | 515,409 | 34 | 70 | 67 | 2,236,575 | 514,234 |
| 4 | 77 | 195 | 2,235,913 | 515,966 | 35 | 66 | 205 | 2,236,428 | 514,042 |
| 5 | 67 | 210 | 2,235,913 | 515,966 | 36 | 85 | 300 | 2,236,347 | 513,867 |
| 6 | 82 | 248 | 2,235,913 | 515,966 | 37 | 80 | 335 | 2,236,347 | 513,867 |
| 7 | 70 | 210 | 2,235,740 | 516,013 | 38 | 57 | 20 | 2,236,347 | 513,867 |
| 8 | 72 | 208 | 2,235,740 | 516,013 | 39 | 42 | 284 | 2,236,338 | 513,816 |
| 9 | 90 | 193 | 2,235,740 | 516,013 | 40 | 50 | 251 | 2,236,338 | 513,816 |
| 10 | 67 | 185 | 2,235,655 | 516,086 | 41 | 58 | 261 | 2,236,338 | 513,816 |
| 11 | 73 | 180 | 2,235,655 | 516,086 | 42 | 82 | 230 | 2,236,338 | 513,816 |
| 12 | 63 | 182 | 2,235,655 | 516,086 | 43 | 87 | 227 | 2,236,338 | 513,816 |
| 13 | 70 | 184 | 2,235,655 | 516,086 | 44 | 85 | 78 | 2,236,357 | 513,655 |
| 14 | 65 | 182 | 2,235,655 | 516,086 | 45 | 62 | 248 | 2,236,344 | 513,540 |
| 15 | 74 | 95 | 2,235,644 | 515,914 | 46 | 62 | 220 | 2,236,344 | 513,540 |
| 16 | 72 | 110 | 2,235,644 | 515,914 | 47 | 75 | 240 | 2,236,344 | 513,540 |
| 17 | 49 | 178 | 2,235,637 | 515,750 | 48 | 75 | 175 | 2,236,344 | 513,540 |
| 18 | 90 | 359 | 2,235,644 | 515,914 | 49 | 72 | 330 | 2,236,235 | 513,583 |
| 19 | 62 | 126 | 2,235,503 | 515,688 | 50 | 88 | 209 | 2,236,139 | 513,500 |
| 20 | 60 | 94 | 2,235,503 | 515,688 | 51 | 90 | 204 | 2,236,139 | 513,500 |
| 21 | 54 | 25 | 2,236,236 | 515,417 | 52 | 62 | 140 | 2,236,139 | 513,500 |
| 22 | 80 | 12 | 2,236,236 | 515,417 | 53 | 82 | 20 | 2,236,100 | 513,572 |
| 23 | 46 | 357 | 2,236,236 | 515,417 | 54 | 72 | 190 | 2,236,100 | 513,572 |
| 24 | 57 | 70 | 2,236,236 | 515,417 | 55 | 58 | 170 | 2,236,100 | 513,572 |
| 25 | 52 | 70 | 2,236,236 | 515,417 | 56 | 17 | 199 | 2,236,148 | 513,352 |
| 26 | 62 | 69 | 2,236,236 | 515,417 | 57 | 78 | 27 | 2,236,148 | 513,352 |
| 27 | 52 | 140 | 2,236,236 | 515,417 | 58 | 68 | 18 | 2,236,306 | 513,349 |
| 28 | 81 | 185 | 2,236,450 | 514,816 | 59 | 63 | 355 | 2,236,306 | 513,349 |
| 29 | 89 | 178 | 2,236,450 | 514,816 | 60 | 60 | 189 | 2,236,306 | 513,349 |
| 30 | 82 | 244 | 2,236,450 | 514,816 | 61 | 60 | 195 | 2,236,426 | 513,263 |
| 31 | 90 | 69 | 2,236,470 | 514,659 | 62 | 60 | 165 | 2,235,326 | 512,812 |

Diques

Tabla D2. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Lucía – San José Tepenéné.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 90 | 163 | 2,235,963 | 515,809 |
| 2 | 87 | 265 | 2,236,447 | 514,778 |
| 3 | 64 | 190 | 2,236,357 | 513,655 |
| 4 | 40 | 182 | 2,236,295 | 513,616 |
| 5 | 68 | 198 | 2,236,235 | 513,583 |
| 6 | 62 | 200 | 2,236,347 | 513,335 |
| 7 | 90 | 10 | 2,236,533 | 513,217 |
| 8 | 90 | 212 | 2,236,056 | 513,233 |

Zona minera Santa Rosa

Fallas

Tabla A3. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------------|-----------|-----------|--------|---------------|------------------------------------------------|-----------|
| 1 | 72 | 180 | 2,235,138 | 515,553 | 37 | 57 | 155 | 2,234,061 | 516,655 |
| 2 | 63 | 170 | 2,235,138 | 515,553 | 38 | 69 | 180 | 2,234,061 | 516,655 |
| 3 | 73 | 180 | 2,235,138 | 515,553 | 39 | 67 | 180 | 2,234,061 | 516,655 |
| 4 | 75 | 75 | 2,234,422 | 515,534 | 40 | 73 | 192 | 2,234,061 | 516,655 |
| 5 | 88 | 103 | 2,243,050 | 515,181 | 41 | 77 | 90 | 2,233,879 | 516,669 |
| 6 | 70 | 185 | 2,243,050 | 515,181 | 42 | 75 | 210 | 2,233,762 | 516,630 |
| 7 | 76 | 53 | 2,234,118 | 515,200 | 43 | 83 | 230 | 2,233,762 | 516,630 |
| 8 | 89 | 15 | 2,234,118 | 515,200 | 44 | 88 | 130 | 2,233,762 | 516,630 |
| 9 | 90 | 278 | 2,233,603 | 515,220 | 45 | 77 | 224 | 2,233,762 | 516,630 |
| 10 | 85 | 290 | 2,235,651 | 517,841 | 46 | 90 | 310 | 2,233,762 | 516,630 |
| 11 | 85 | 120 | al w 30 m de B9 | | 47 | 78 | 310 | 2,233,762 | 516,630 |
| 12 | 64 | 212 | 2,234,964 | 517,137 | 48 | 85 | 30 | 2,233,762 | 516,630 |
| 13 | 74 | 195 | 2,234,964 | 517,137 | 49 | 87 | 80 | 2,233,576 | 516,371 |
| 14 | 47 | 138 | 2,234,964 | 517,137 | 50 | 80 | 75 | 2,233,576 | 516,371 |
| 15 | 40 | 330 | 2,233,981 | 517,094 | 51 | 79 | 348 | 2,233,576 | 516,371 |
| 16 | 54 | 8 | 2,233,988 | 517,058 | 52 | 83 | 350 | 2,233,576 | 516,371 |
| 17 | 60 | 10 | 2,234,128 | 517,218 | 53 | 67 | 332 | 2,233,576 | 516,371 |
| 18 | 53 | 162 | 2,234,256 | 517,295 | 54 | 72 | 330 | 2,233,576 | 516,371 |
| 19 | 54 | 162 | 2,234,268 | 517,441 | 55 | 75 | 313 | 2,233,576 | 516,371 |
| 20 | 60 | 180 | 2,234,283 | 517,363 | 56 | 72 | 334 | 2,233,576 | 516,371 |
| 21 | 80 | 185 | 2,234,283 | 517,363 | 57 | 64 | 200 | 2,235,220 | 516,357 |
| 22 | 72 | 187 | 2,234,359 | 517,360 | 58 | 74 | 208 | a 50 m de la entrada | |
| 23 | 72 | 187 | 2,234,359 | 517,360 | 59 | 72 | 95 | a 80 m de la entrada de mina La Cruz al NE 30 | |
| 24 | 60 | 311 | 2,233,476 | 515,425 | 60 | 52 | 188 | | |
| 25 | 90 | 158 | 2,233,476 | 515,425 | 61 | 60 | 220 | | |
| 26 | 82 | 114 | 2,233,476 | 515,425 | 62 | 28 | 252 | a 110 m de la entrada de mina La Cruz al NE 30 | |
| 27 | 90 | 70 | 2,233,476 | 515,425 | 63 | 55 | 230 | | |
| 28 | 72 | 50 | 2,234,184 | 516,850 | 64 | 73 | 180 | | |
| 29 | 57 | 327 | 2,234,184 | 516,850 | 65 | 63 | 195 | 2,235,197 | 516,293 |
| 30 | 67 | 225 | 2,234,106 | 516,756 | 66 | 57 | 210 | 2,235,288 | 516,345 |
| 31 | 78 | 180 | 2,234,106 | 516,756 | 67 | 45 | 183 | 2,235,310 | 516,419 |
| 32 | 62 | 220 | 2,234,106 | 516,756 | 68 | 86 | 190 | 2,235,329 | 516,527 |

Vetas

Tabla B3. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|------------------------------------------------|-----------|
| 1 | 74 | 240 | 2,235,009 | 517,311 |
| 2 | 86 | 225 | 2,234,361 | 516,932 |
| 3 | 60 | 198 | 2,234,361 | 516,932 |
| 4 | 88 | 38 | 2,234,361 | 516,932 |
| 5 | 53 | 162 | 2,234,256 | 517,295 |
| 6 | 72 | 187 | 2,234,359 | 517,360 |
| 7 | 72 | 187 | 2,234,359 | 517,360 |
| 8 | 82 | 342 | 2,234,295 | 517,278 |
| 9 | 67 | 184 | 2,234,061 | 516,655 |
| 10 | 52 | 180 | a 20 m de la entrada de mina La Cruz al NE 30 | |
| 11 | 82 | 227 | a 130 m de la entrada de mina La Cruz al NE 30 | |
| 12 | 73 | 195 | a 130 m de la entrada de mina La Cruz al NE 30 | |
| 13 | 80 | 168 | a 110 m de la entrada mina La Cruz al NE 30 | |
| 14 | 71 | 208 | a 110 m de la entrada mina La Cruz al NE 30 | |
| 15 | 58 | 220 | a 110 m de la entrada mina La Cruz al NE 30 | |
| 16 | 73 | 194 | 2,235,344 | 516,538 |
| 17 | 48 | 183 | 2,235,315 | 516,886 |
| 18 | 70 | 208 | 2,235,187 | 517,174 |
| 19 | 62 | 223 | 2,235,044 | 517,103 |

Fracturas

Tabla C3. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa (continúa en la siguiente página)

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|----------------------|-----------|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 74 | 190 | 2,235,340 | 515,552 | 61 | 88 | 310 | 2,235,626 | 517,635 |
| 2 | 80 | 184 | 2,235,340 | 515,552 | 62 | 78 | 322 | 2,235,626 | 517,635 |
| 3 | 88 | 80 | 2,235,138 | 515,553 | 63 | 85 | 235 | 2,235,626 | 517,635 |
| 4 | 85 | 79 | 2,235,138 | 515,553 | 64 | 55 | 8 | 2,235,626 | 517,635 |
| 5 | 88 | 82 | 2,235,138 | 515,553 | 65 | 35 | 125 | 2,235,138 | 517,582 |
| 6 | 68 | 180 | 2,235,138 | 515,553 | 66 | 90 | 178 | 2,235,138 | 517,582 |
| 7 | 72 | 170 | 2,235,138 | 515,553 | 67 | 50 | 118 | 2,235,118 | 517,469 |
| 8 | 60 | 190 | 2,235,138 | 515,553 | 68 | 70 | 220 | 2,235,118 | 517,469 |
| 9 | 82 | 180 | 2,234,975 | 515,599 | 69 | 35 | 210 | 2,235,118 | 517,469 |
| 10 | 62 | 80 | 2,234,975 | 515,599 | 70 | 78 | 160 | 2,235,030 | 517,348 |
| 11 | 58 | 72 | 2,234,975 | 515,599 | 71 | 85 | 165 | 2,234,964 | 517,137 |
| 12 | 85 | 78 | 2,234,975 | 515,599 | 72 | 74 | 184 | 2,234,964 | 517,137 |
| 13 | 72 | 238 | 2,234,975 | 515,599 | 73 | 66 | 180 | 2,234,964 | 517,137 |
| 14 | 82 | 88 | 2,234,975 | 515,599 | 74 | 88 | 122 | 2,234,964 | 517,137 |
| 15 | 76 | 355 | 2,234,975 | 515,599 | 75 | 82 | 168 | 2,234,964 | 517,137 |
| 16 | 50 | 360 | 2,234,642 | 515,652 | 76 | 81 | 270 | 2,234,964 | 517,137 |
| 17 | 70 | 322 | 2,234,642 | 515,652 | 77 | 80 | 212 | 2,234,964 | 517,137 |
| 18 | 89 | 150 | 2,234,525 | 515,632 | 78 | 70 | 217 | 2,234,964 | 517,137 |
| 19 | 80 | 205 | 2,234,525 | 515,632 | 79 | 78 | 228 | 2,234,964 | 517,137 |
| 20 | 88 | 65 | 2,234,525 | 515,632 | 80 | 81 | 273 | 2,234,964 | 517,137 |
| 21 | 90 | 65 | 2,234,525 | 515,632 | 81 | 62 | 173 | 2,234,964 | 517,137 |
| 22 | 82 | 158 | 2,234,525 | 515,632 | 82 | 90 | 50 | 2,234,964 | 517,137 |
| 23 | 83 | 250 | 2,234,422 | 515,534 | 83 | 68 | 182 | 2,234,964 | 517,137 |
| 24 | 90 | 170 | 2,234,422 | 515,534 | 84 | 80 | 160 | 2,234,964 | 517,137 |
| 25 | 90 | 80 | 2,234,422 | 515,534 | 85 | 89 | 77 | 2,235,009 | 517,311 |
| 26 | 76 | 355 | 2,234,422 | 515,534 | 86 | 80 | 380 | 2,234,361 | 516,932 |
| 27 | 80 | 170 | 2,234,422 | 515,534 | 87 | 50 | 305 | 2,234,361 | 516,932 |
| 28 | 78 | 174 | 2,234,283 | 515,401 | 88 | 55 | 155 | 2,234,361 | 516,932 |
| 29 | 90 | 168 | 2,234,283 | 515,401 | 89 | 82 | 18 | 2,234,361 | 516,932 |
| 30 | 77 | 112 | 2,243,050 | 515,181 | 90 | 70 | 294 | 2,234,316 | 516,927 |
| 31 | 84 | 98 | 2,243,050 | 515,181 | 91 | 67 | 110 | 2,234,316 | 516,927 |
| 32 | 58 | 220 | 2,243,050 | 515,181 | 92 | 60 | 90 | 2,234,316 | 516,927 |
| 33 | 80 | 205 | 2,243,050 | 515,181 | 93 | 65 | 90 | 2,234,316 | 516,927 |
| 34 | 80 | 90 | 2,243,050 | 515,181 | 94 | 70 | 110 | 2,234,316 | 516,927 |
| 35 | 78 | 152 | 2,234,118 | 515,200 | 95 | 67 | 170 | 2,234,359 | 517,360 |
| 36 | 68 | 130 | 2,234,118 | 515,200 | 96 | 57 | 155 | 2,234,359 | 517,360 |
| 37 | 68 | 258 | 2,333,599 | 515,305 | 97 | 67 | 212 | 2,234,359 | 517,360 |
| 38 | 60 | 260 | 2,333,599 | 515,305 | 98 | 87 | 195 | 2,234,359 | 517,360 |
| 39 | 63 | 260 | 2,333,599 | 515,305 | 99 | 52 | 215 | 2,234,231 | 517,998 |
| 40 | 88 | 290 | 20 m al NE 80 de F21 | | 100 | 63 | 210 | 2,234,231 | 517,998 |
| 41 | 80 | 298 | 30 m al SE 50 de F21 | | 101 | 83 | 55 | 2,234,231 | 517,998 |
| 42 | 62 | 298 | 30 m al SE 50 de F21 | | 102 | 55 | 108 | 2,234,268 | 517,329 |
| 43 | 70 | 30 | 30 m al SE 50 de F21 | | 103 | 72 | 86 | 2,234,268 | 517,329 |
| 44 | 74 | 200 | 2,235,907 | 518,030 | 104 | 70 | 352 | 2,234,268 | 517,329 |
| 45 | 65 | 269 | 2,235,907 | 518,030 | 105 | 82 | 342 | 2,234,268 | 517,329 |
| 46 | 79 | 120 | 2,235,858 | 518,010 | 106 | 68 | 102 | 2,234,268 | 517,329 |
| 47 | 85 | 290 | 2,235,858 | 518,010 | 107 | 78 | 328 | 2,234,268 | 517,329 |
| 48 | 59 | 168 | 2,235,757 | 517,969 | 108 | 63 | 352 | 2,234,268 | 517,329 |
| 49 | 82 | 321 | 2,235,757 | 517,969 | 109 | 73 | 315 | 2,234,268 | 517,329 |
| 50 | 60 | 135 | 2,235,757 | 517,969 | 110 | 70 | 78 | 2,234,268 | 517,329 |
| 51 | 75 | 138 | igual que B4 | | 111 | 50 | 42 | 2,233,476 | 515,425 |
| 52 | 88 | 128 | 2,235,757 | 517,969 | 112 | 61 | 58 | 2,233,476 | 515,425 |
| 53 | 80 | 110 | 2,235,757 | 517,969 | 113 | 64 | 302 | 2,233,476 | 515,425 |
| 54 | 88 | 115 | 2,235,757 | 517,969 | 114 | 50 | 55 | 2,233,476 | 515,425 |
| 55 | 62 | 182 | 2,235,651 | 517,841 | 115 | 56 | 354 | 2,233,476 | 515,425 |
| 56 | 58 | 160 | 2,235,651 | 517,841 | 116 | 51 | 359 | 2,233,476 | 515,425 |
| 57 | 78 | 85 | 2,235,605 | 517,738 | 117 | 65 | 52 | 2,234,184 | 516,850 |
| 58 | 58 | 169 | 2,235,435 | 517,653 | 118 | 80 | 5 | 2,234,184 | 516,850 |
| 59 | 65 | 243 | 2,235,435 | 517,653 | 119 | 73 | 68 | 2,234,184 | 516,850 |
| 60 | 70 | 330 | 2,235,626 | 517,635 | 120 | 80 | 245 | 2,234,184 | 516,850 |

Tabla C3. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa (continuación)

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 121 | 55 | 305 | 2,234,184 | 516,850 |
| 122 | 66 | 40 | 2,234,184 | 516,850 |
| 123 | 64 | 60 | 2,234,184 | 516,850 |
| 124 | 74 | 66 | 2,234,184 | 516,850 |
| 125 | 90 | 70 | 2,234,184 | 516,850 |
| 126 | 78 | 30 | 2,234,106 | 516,756 |
| 127 | 68 | 80 | 2,234,106 | 516,756 |
| 128 | 82 | 5 | 2,234,106 | 516,756 |
| 129 | 70 | 309 | 2,234,106 | 516,756 |
| 130 | 60 | 55 | 2,234,106 | 516,756 |
| 131 | 90 | 180 | 2,234,106 | 516,756 |
| 132 | 55 | 62 | 2,234,106 | 516,756 |
| 133 | 90 | 79 | 2,234,106 | 516,756 |
| 134 | 84 | 160 | 2,234,106 | 516,756 |
| 135 | 80 | 311 | 2,234,106 | 516,756 |
| 136 | 44 | 201 | 2,234,106 | 516,756 |
| 137 | 88 | 213 | 2,234,106 | 516,756 |
| 138 | 45 | 205 | 2,234,106 | 516,756 |
| 139 | 90 | 158 | 2,234,106 | 516,756 |
| 140 | 60 | 194 | 2,234,061 | 516,655 |
| 141 | 50 | 107 | 2,234,061 | 516,655 |
| 142 | 82 | 70 | 2,234,061 | 516,655 |
| 143 | 41 | 209 | 2,234,061 | 516,655 |
| 144 | 25 | 260 | 2,234,061 | 516,655 |
| 145 | 84 | 130 | 2,234,061 | 516,655 |
| 146 | 80 | 191 | 2,234,061 | 516,655 |
| 147 | 55 | 20 | 2,234,061 | 516,655 |
| 148 | 81 | 180 | 2,234,061 | 516,655 |
| 149 | 55 | 28 | 2,233,879 | 516,669 |
| 150 | 54 | 338 | 2,233,879 | 516,669 |
| 151 | 50 | 41 | 2,233,879 | 516,669 |
| 152 | 56 | 10 | 2,233,879 | 516,669 |
| 153 | 31 | 326 | 2,233,879 | 516,669 |
| 154 | 80 | 150 | 2,233,879 | 516,669 |
| 155 | 54 | 342 | 2,233,879 | 516,669 |
| 156 | 78 | 323 | 2,233,879 | 516,669 |
| 157 | 65 | 258 | 2,233,879 | 516,669 |
| 158 | 88 | 279 | 2,233,879 | 516,669 |
| 159 | 65 | 210 | 2,233,762 | 516,630 |
| 160 | 58 | 183 | 2,233,762 | 516,630 |
| 161 | 53 | 220 | 2,235,055 | 516,628 |
| 162 | 44 | 235 | 2,235,055 | 516,628 |
| 163 | 82 | 352 | 2,235,055 | 516,628 |
| 164 | 50 | 160 | 2,235,250 | 516,350 |
| 165 | 75 | 223 | 2,235,197 | 516,293 |

Diques

Tabla D3. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Santa Rosa

| Secuencia | Echado | Dip direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 84 | 90 | 2,234,283 | 515,401 |

Zona minera Ernestina – Puerto del Oro

Fallas

Tabla A4. Datos de fallas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 63 | 158 | 2,230,848 | 515,455 | 46 | 70 | 163 | 2,233,506 | 516,419 |
| 2 | 82 | 265 | 2,232,738 | 517,226 | 47 | 52 | 341 | 2,233,293 | 516,299 |
| 3 | 62 | 233 | 2,232,738 | 517,226 | 48 | 69 | 305 | 2,232,826 | 516,463 |
| 4 | 63 | 335 | 2,232,647 | 515,394 | 49 | 90 | 30 | 2,232,420 | 516,435 |
| 5 | 72 | 320 | 2,232,647 | 515,394 | 50 | 85 | 355 | 2,232,420 | 516,435 |
| 6 | 88 | 155 | 2,232,327 | 515,590 | 51 | 80 | 205 | 2,232,420 | 516,435 |
| 7 | 88 | 202 | 2,232,327 | 515,590 | 52 | 88 | 62 | 2,232,298 | 516,595 |
| 8 | 75 | 48 | 2,232,327 | 515,590 | 53 | 90 | 168 | 2,232,293 | 516,558 |
| 9 | 90 | 300 | 2,232,327 | 515,590 | 54 | 60 | 4 | 2,232,293 | 516,558 |
| 10 | 49 | 70 | 2,232,327 | 515,590 | 55 | 51 | 35 | 2,232,218 | 516,613 |
| 11 | 60 | 328 | 2,232,264 | 515,555 | 56 | 84 | 21 | 2,232,218 | 516,613 |
| 12 | 76 | 218 | 2,232,194 | 515,635 | 57 | 70 | 155 | 2,232,218 | 516,613 |
| 13 | 67 | 256 | 2,232,194 | 515,635 | 58 | 75 | 67 | 2,232,099 | 516,646 |
| 14 | 89 | 70 | 2,232,194 | 515,635 | 59 | 78 | 205 | 2,231,932 | 516,701 |
| 15 | 64 | 22 | 2,231,329 | 515,679 | 60 | 82 | 65 | 2,231,437 | 516,705 |
| 16 | 70 | 8 | 2,231,329 | 515,679 | 61 | 78 | 15 | 2,231,362 | 516,734 |
| 17 | 84 | 75 | 2,231,329 | 515,679 | 62 | 75 | 158 | 2,231,187 | 516,734 |
| 18 | 62 | 76 | 2,231,329 | 515,679 | 63 | 28 | 355 | 2,231,445 | 516,734 |
| 19 | 57 | 318 | 2,231,329 | 515,679 | 64 | 85 | 200 | 2,232,159 | 516,617 |
| 20 | 65 | 313 | 2,231,329 | 515,679 | 65 | 71 | 247 | 2,232,159 | 516,705 |
| 21 | 64 | 303 | 2,231,329 | 515,679 | 66 | 68 | 350 | 2,233,060 | 516,705 |
| 22 | 76 | 330 | 2,231,329 | 515,679 | 67 | 72 | 163 | 2,233,060 | 516,705 |
| 23 | 60 | 25 | 2,231,329 | 515,679 | 68 | 70 | 360 | 2,232,883 | 516,441 |
| 24 | 86 | 352 | 2,231,329 | 515,679 | 69 | 22 | 118 | 2,232,883 | 516,441 |
| 25 | 88 | 85 | 2,231,329 | 515,679 | 70 | 75 | 25 | 2,232,418 | 516,441 |
| 26 | 77 | 222 | 2,231,329 | 515,679 | 71 | 90 | 255 | 2,232,418 | 516,441 |
| 27 | 68 | 9 | 2,231,329 | 515,679 | 72 | 82 | 275 | 2,232,418 | 516,441 |
| 28 | 61 | 14 | 2,231,329 | 515,679 | 73 | 70 | 330 | 2,232,418 | 516,441 |
| 29 | 82 | 247 | 2,231,114 | 515,502 | 74 | 67 | 20 | 2,232,094 | 516,439 |
| 30 | 80 | 315 | 2,231,114 | 515,502 | 75 | 74 | 325 | 2,232,094 | 516,480 |
| 31 | 64 | 350 | 2,231,114 | 515,502 | 76 | 34 | 90 | 2,231,435 | 516,480 |
| 32 | 64 | 350 | 2,231,114 | 515,502 | 77 | 83 | 200 | 2,231,435 | 516,480 |
| 33 | 65 | 305 | 2,231,114 | 515,502 | 78 | 82 | 20 | 2,231,435 | 516,645 |
| 34 | 68 | 35 | 2,231,114 | 515,502 | 79 | 33 | 18 | 2,231,435 | 516,645 |
| 35 | 78 | 35 | 2,231,114 | 515,502 | 80 | 60 | 175 | 2,231,435 | 516,645 |
| 36 | 83 | 292 | 2,231,114 | 515,502 | 81 | 60 | 190 | 2,231,435 | 516,678 |
| 37 | 84 | 23 | 2,231,114 | 515,502 | 82 | 63 | 195 | 2,231,435 | 516,708 |
| 38 | 80 | 280 | 2,231,114 | 515,502 | 83 | 78 | 5 | 2,231,435 | 516,708 |
| 39 | 80 | 280 | 2,231,114 | 515,502 | 84 | 83 | 225 | 2,231,435 | 516,708 |
| 40 | 83 | 300 | 2,231,114 | 515,502 | 85 | 60 | 145 | 2,231,435 | 516,708 |
| 41 | 82 | 360 | 2,231,114 | 515,502 | 86 | 80 | 18 | 2,231,435 | 516,708 |
| 42 | 50 | 327 | 2,231,114 | 515,502 | 87 | 45 | 175 | 2,231,435 | 516,708 |
| 43 | 83 | 358 | 2,231,114 | 515,502 | 88 | 73 | 35 | 2,231,037 | 516,708 |
| 44 | 90 | 335 | 2,231,114 | 515,502 | 89 | 78 | 355 | 2,231,037 | 516,708 |
| 45 | 78 | 205 | 2,231,114 | 515,502 | | | | | |

Vetas

Tabla B4. Datos de vetas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 56 | 329 | 2,233,206 | 516,377 |
| 2 | 80 | 359 | 2,232,884 | 516,440 |

Fracturas

Tabla C4. Datos de fracturas para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro.

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE | Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 90 | 295 | 2,232,742 | 515,228 | 51 | 82 | 350 | 2,232,738 | 517,226 |
| 2 | 70 | 28 | 2,232,742 | 515,228 | 52 | 73 | 86 | 2,232,738 | 517,226 |
| 3 | 68 | 52 | 2,232,742 | 515,228 | 53 | 86 | 70 | 2,232,738 | 517,226 |
| 4 | 90 | 185 | 2,232,687 | 515,266 | 54 | 85 | 250 | 2,232,738 | 517,226 |
| 5 | 85 | 290 | 2,232,638 | 515,403 | 55 | 38 | 355 | 2,232,647 | 515,394 |
| 6 | 72 | 322 | 2,232,638 | 515,403 | 56 | 72 | 357 | 2,232,647 | 515,394 |
| 7 | 60 | 360 | 2,232,638 | 515,403 | 57 | 70 | 48 | 2,232,327 | 515,590 |
| 8 | 70 | 330 | 2,232,638 | 515,403 | 58 | 63 | 51 | 2,232,327 | 515,590 |
| 9 | 75 | 258 | 2,232,633 | 515,472 | 59 | 90 | 39 | 2,232,327 | 515,590 |
| 10 | 72 | 258 | 2,232,633 | 515,472 | 60 | 69 | 10 | 2,232,327 | 515,590 |
| 11 | 78 | 270 | 2,232,344 | 515,618 | 61 | 77 | 35 | 2,232,327 | 515,590 |
| 12 | 80 | 80 | 2,232,344 | 515,618 | 62 | 82 | 340 | 2,232,327 | 515,590 |
| 13 | 80 | 12 | 2,232,344 | 515,618 | 63 | 70 | 41 | 2,232,327 | 515,590 |
| 14 | 84 | 10 | 2,232,277 | 515,549 | 64 | 88 | 39 | 2,232,327 | 515,590 |
| 15 | 69 | 222 | 2,232,277 | 515,549 | 65 | 78 | 37 | 2,232,327 | 515,590 |
| 16 | 72 | 10 | 2,231,836 | 515,789 | 66 | 73 | 25 | 2,232,264 | 515,555 |
| 17 | 75 | 35 | 2,231,836 | 515,789 | 67 | 81 | 244 | 2,232,264 | 515,555 |
| 18 | 62 | 25 | 2,231,836 | 515,789 | 68 | 81 | 350 | 2,232,194 | 515,635 |
| 19 | 28 | 330 | 2,231,836 | 515,789 | 69 | 70 | 5 | 2,232,194 | 515,635 |
| 20 | 75 | 42 | 2,231,836 | 515,789 | 70 | 90 | 274 | 2,232,194 | 515,635 |
| 21 | 78 | 258 | 2,231,836 | 515,789 | 71 | 76 | 258 | 2,232,194 | 515,635 |
| 22 | 52 | 352 | 2,231,836 | 515,789 | 72 | 79 | 187 | 2,232,194 | 515,635 |
| 23 | 89 | 20 | 2,231,836 | 515,789 | 73 | 56 | 50 | 2,231,329 | 515,679 |
| 24 | 81 | 26 | 2,231,836 | 515,789 | 74 | 70 | 5 | 2,231,329 | 515,679 |
| 25 | 58 | 100 | 2,231,111 | 515,505 | 75 | 68 | 20 | 2,231,329 | 515,679 |
| 26 | 76 | 15 | 2,231,086 | 515,514 | 76 | 67 | 40 | 2,231,329 | 515,679 |
| 27 | 80 | 34 | 2,231,086 | 515,514 | 77 | 62 | 8 | 2,231,329 | 515,679 |
| 28 | 80 | 30 | 2,231,086 | 515,514 | 78 | 65 | 356 | 2,231,329 | 515,679 |
| 29 | 80 | 190 | 2,231,086 | 515,514 | 79 | 78 | 81 | 2,231,329 | 515,679 |
| 30 | 85 | 13 | 2,231,086 | 515,514 | 80 | 77 | 34 | 2,231,114 | 515,502 |
| 31 | 72 | 272 | 2,230,848 | 515,455 | 81 | 90 | 218 | 2,231,114 | 515,502 |
| 32 | 64 | 210 | 2,230,848 | 515,455 | 82 | 90 | 222 | 2,231,114 | 515,502 |
| 33 | 89 | 135 | 2,230,787 | 515,580 | 83 | 82 | 48 | 2,231,114 | 515,502 |
| 34 | 85 | 250 | 2,230,716 | 515,203 | 84 | 58 | 348 | 2,231,114 | 515,502 |
| 35 | 82 | 237 | 2,230,716 | 515,203 | 85 | 84 | 297 | 2,231,114 | 515,502 |
| 36 | 85 | 245 | 2,230,716 | 515,203 | 86 | 77 | 5 | 2,231,114 | 515,502 |
| 37 | 62 | 228 | 2,230,716 | 515,203 | 87 | 68 | 215 | 2,231,114 | 515,502 |
| 38 | 90 | 60 | 2,230,764 | 515,918 | 88 | 78 | 206 | 2,231,114 | 515,502 |
| 39 | 82 | 213 | 2,230,764 | 515,918 | 89 | 80 | 218 | 2,231,114 | 515,502 |
| 40 | 81 | 51 | 2,232,738 | 517,226 | 90 | 51 | 308 | 2,231,114 | 515,502 |
| 41 | 90 | 98 | 2,232,738 | 517,226 | 91 | 82 | 37 | 2,231,114 | 515,502 |
| 42 | 88 | 288 | 2,232,738 | 517,226 | 92 | 89 | 10 | 2,231,114 | 515,502 |
| 43 | 88 | 278 | 2,232,738 | 517,226 | 93 | 80 | 77 | 2,233,629 | 516,406 |
| 44 | 62 | 2 | 2,232,738 | 517,226 | 94 | 88 | 70 | 2,233,629 | 516,406 |
| 45 | 90 | 260 | 2,232,738 | 517,226 | 95 | 80 | 8 | 2,233,506 | 516,419 |
| 46 | 58 | 317 | 2,232,738 | 517,226 | 96 | 89 | 15 | 2,233,506 | 516,419 |
| 47 | 77 | 164 | 2,232,738 | 517,226 | 97 | 89 | 220 | 2,233,506 | 516,419 |
| 48 | 78 | 85 | 2,232,738 | 517,226 | 98 | 59 | 202 | 2,233,506 | 516,419 |
| 49 | 63 | 180 | 2,232,738 | 517,226 | 99 | 81 | 189 | 2,233,506 | 516,419 |
| 50 | 74 | 88 | 2,232,738 | 517,226 | 100 | 80 | 1 | 2,233,506 | 516,419 |

Diques

Tabla D4. Datos de diques para los estereogramas y rosetas de la zona minera Ernestina – Puerto del Oro

| Secuencia | Echado | Dip Direction | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 74 | 360 | 2,231,114 | 515,502 |
| 2 | 73 | 320 | 2,231,114 | 515,502 |
| 3 | 70 | 163 | 2,233,506 | 516,419 |

Anexo 2 Tablas de datos utilizados para el análisis en FaultKin

Zona Minera de Santa Rosa

Tabla A5. Datos de Fallas de la Zona Minera de Santa Rosa utilizados para el análisis en FaultKin.

| Secuencia | Pto de obser | Rumbo Az | Echado | Dip | Direction | Pitch | Dirección pitch | Bloque | Trend | Plunge | Cinemática | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------------|----------|--------|-----|-----------|-------|-----------------|--------|-------|--------|------------|-----------------|-----------|
| 1 | B6 | 200 | 85 | 290 | 23 | SW | BB | 202 | 23 | NL | | 2,235,651 | 517,841 |
| 2 | B10 | 30 | 85 | 120 | 13 | SW | BB | 209 | 13 | TL | | al w 30 m de B9 | |
| 3 | B16 | 122 | 64 | 212 | 0 | E | BB | 122 | 0 | L | | 2,234,964 | 517,137 |
| 4 | B16 | 105 | 74 | 195 | 18 | E | BB | 110 | 17 | NL | | 2,234,964 | 517,137 |
| 5 | B21 | 278 | 54 | 8 | 90 | N | BB | 8 | 54 | N | | 2,233,988 | 517,058 |
| 6 | B22 | 78 | 58 | 168 | 50 | SW | BB | 226 | 41 | NR | | 2,233,988 | 517,058 |
| 7 | B22 | 78 | 58 | 168 | 80 | SW | BB | 186 | 57 | N | | 2,233,988 | 517,058 |
| 8 | B23 | 280 | 78 | 10 | 90 | N | BB | 78 | 10 | N | | 2,234,101 | 517,164 |
| 9 | B23 | 7 | 26 | 97 | 40 | SW | BB | 150 | 16 | NR | | 2,234,101 | 517,164 |
| 10 | B24 | 280 | 60 | 10 | 85 | NW | BB | 0 | 60 | N | | 2,234,128 | 517,218 |
| 11 | B25 | 92 | 53 | 182 | 78 | NE | BB | 163 | 51 | N | | 2,234,256 | 517,295 |
| 12 | B26 | 72 | 54 | 162 | 70 | SW | BB | 194 | 49 | N | | 2,234,268 | 517,441 |
| 13 | B27 | 90 | 60 | 180 | 89 | SW | BB | 182 | 60 | N | | 2,234,283 | 517,363 |
| 14 | B27 | 95 | 80 | 185 | 35 | SE | BB | 102 | 34 | NL | | 2,234,283 | 517,363 |
| 15 | B28 | 97 | 72 | 187 | 0 | E | BB | 97 | 0 | L | | 2,234,359 | 517,360 |
| 16 | B28 | 97 | 72 | 187 | 90 | S | BB | 187 | 72 | N | | 2,234,359 | 517,360 |

Zona Minera Santa Lucía – San José Tepeñené

Tabla A6. Datos de Fallas de la Zona Minera Santa Lucía – San José Tepeñené utilizados para el análisis en FaultKin.

| Secuencia | Pto de obser | Rumbo Az | Echado | Dip | Direction | Pitch | Dirección pitch | Bloque | Trend | Plunge | Cinemática | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------------|----------|--------|-----|-----------|-------|-----------------|--------|-------|--------|------------|-----------|-----------|
| 1 | T1 | 342 | 81 | 72 | 80 | SE | BA | 120 | 77 | 77 | N | 2,236,236 | 515,417 |
| 2 | T1 | 0 | 80 | 90 | 90 | E | BB | 90 | 80 | 80 | N | 2,236,236 | 515,417 |
| 3 | T3 | 230 | 60 | 320 | 90 | N | BB | 320 | 60 | 60 | N | 2,236,371 | 515,074 |
| 4 | T3 | 120 | 62 | 210 | 90 | S | BB | 210 | 62 | 62 | N | 2,236,371 | 515,074 |
| 5 | T4 | 154 | 82 | 244 | 85 | SE | BB | 212 | 81 | 81 | N | 2,236,450 | 514,816 |
| 6 | T4 | 105 | 65 | 195 | 85 | NW | BB | 207 | 65 | 65 | N | 2,236,450 | 514,816 |
| 7 | T4 | 177 | 82 | 267 | 80 | SE | BB | 215 | 77 | 77 | N | 2,236,450 | 514,816 |
| 8 | T5 | 167 | 70 | 257 | 90 | S | BB | 257 | 70 | 70 | N | 2,236,447 | 514,778 |
| 9 | T6 | 290 | 59 | 20 | 65 | NW | BB | 338 | 51 | 51 | N | 2,236,470 | 514,659 |
| 10 | T6 | 115 | 67 | 205 | 60 | NW | BB | 261 | 53 | 53 | N | 2,236,470 | 514,659 |
| 11 | T6 | 250 | 52 | 340 | 90 | N | BB | 340 | 52 | 52 | N | 2,236,470 | 514,659 |
| 12 | T10 | 100 | 61 | 190 | 70 | NW | BB | 227 | 55 | 55 | N | 2,236,575 | 514,234 |
| 13 | T10 | 275 | 75 | 5 | 90 | N | BB | 5 | 75 | 75 | N | 2,236,575 | 514,234 |
| 14 | T11 | 115 | 66 | 205 | 55 | SE | BB | 145 | 48 | 48 | N | 2,236,428 | 514,042 |
| 15 | T11 | 108 | 53 | 198 | 40 | SE | BB | 135 | 31 | 31 | NL | 2,236,428 | 514,042 |
| 16 | T11 | 108 | 53 | 198 | 55 | NW | BB | 247 | 41 | 41 | N | 2,236,428 | 514,042 |
| 17 | T12 | 118 | 75 | 208 | 5 | SE | BB | 119 | 5 | 5 | N | 2,236,434 | 513,904 |
| 18 | T12 | 120 | 78 | 210 | 30 | SE | BB | 127 | 29 | 29 | N | 2,236,434 | 513,904 |
| 19 | T12 | 120 | 74 | 210 | 58 | SE | BB | 144 | 55 | 55 | N | 2,236,434 | 513,904 |
| 20 | T12 | 138 | 82 | 228 | 65 | SE | BB | 155 | 64 | 64 | NL | 2,236,434 | 513,904 |
| 21 | T12 | 100 | 65 | 190 | 90 | S | BB | 190 | 65 | 65 | N | 2,236,434 | 513,904 |
| 22 | T12 | 104 | 65 | 194 | 75 | NW | BB | 226 | 61 | 61 | N | 2,236,434 | 513,904 |
| 23 | T13 | 145 | 70 | 235 | 30 | NW | BB | 314 | 28 | 28 | NR | 2,236,426 | 513,859 |
| 24 | T13 | 144 | 72 | 234 | 15 | NW | BB | 319 | 14 | 14 | NR | 2,236,426 | 513,859 |
| 25 | T13 | 130 | 66 | 220 | 55 | NW | BB | 280 | 48 | 48 | NR | 2,236,426 | 513,859 |
| 26 | T13 | 100 | 60 | 190 | 50 | NW | BB | 249 | 42 | 42 | NR | 2,236,426 | 513,859 |
| 27 | T13 | 100 | 60 | 190 | 30 | SE | BB | 116 | 26 | 26 | NL | 2,236,426 | 513,859 |
| 28 | T13 | 100 | 60 | 190 | 90 | S | BB | 190 | 60 | 60 | N | 2,236,426 | 513,859 |
| 29 | T17 | 330 | 80 | 60 | 70 | NW | BA | 356 | 68 | 68 | N | 2,236,295 | 513,616 |
| 30 | T17 | 321 | 90 | 51 | 60 | NW | BA | 321 | 60 | 60 | N | 2,236,295 | 513,616 |
| 31 | T18 | 15 | 63 | 105 | 55 | NE | BB | 48 | 47 | 47 | N | 2,236,344 | 513,540 |
| 32 | T18 | 90 | 60 | 180 | 50 | W | BB | 239 | 42 | 42 | NR | 2,236,344 | 513,540 |
| 33 | T18 | 87 | 72 | 177 | 65 | NW | BB | 233 | 60 | 60 | NR | 2,236,344 | 513,540 |
| 34 | T18 | 112 | 65 | 202 | 70 | NW | BB | 243 | 58 | 58 | NR | 2,236,344 | 513,540 |
| 35 | T19 | 260 | 72 | 350 | 60 | W | BB | 288 | 55 | 55 | NL | 2,236,235 | 513,583 |
| 36 | T21 | 55 | 74 | 145 | 80 | NE | BB | 112 | 71 | 71 | N | 2,236,100 | 513,572 |
| 37 | T22 | 120 | 48 | 210 | 70 | SE | BB | 181 | 44 | 44 | N | 2,236,148 | 513,352 |
| 38 | T28 | 285 | 84 | 15 | 35 | NW | BB | 289 | 35 | 35 | NL | 2,236,401 | 513,388 |
| 39 | T28 | 292 | 84 | 22 | 25 | NW | BB | 295 | 25 | 25 | NL | 2,236,401 | 513,388 |
| 40 | T28 | 293 | 82 | 23 | 70 | NW | BA | 314 | 69 | 69 | N | 2,236,401 | 513,388 |
| 41 | T28 | 300 | 78 | 30 | 70 | NW | BB | 330 | 67 | 67 | N | 2,236,401 | 513,388 |
| 42 | T29 | 100 | 84 | 190 | 57 | NW | BB | 271 | 57 | 57 | NR | 2,236,401 | 513,388 |

Zona Minera de Ernestina Puerto del oro

Tabla A7. Datos de Fallas de Zona Minera de Ernestina Puerto del oro utilizados para el análisis en FaultKin.

| Secuencia | Pto de obser | Rumbo Az | Echado | Dip Direction | Pitch | Dirección pitc | Bloque | Trend | Plunge | Cinemática | Coord. mN | Coord. mE |
|-----------|--------------|----------|--------|---------------|-------|----------------|--------|-------|--------|------------|-----------|-----------|
| 257 | R1 | 221 | 60 | 311 | 55 | NE | BA | 5 | 45 | T | 2233476 | 515425 |
| 258 | R1 | 68 | 90 | 158 | 80 | SW | BA | 248 | 80 | N | 2233476 | 515425 |
| 259 | R1 | 204 | 82 | 114 | 90 | N | BB | 114 | 82 | N | 2233476 | 515425 |
| 260 | R1 | 340 | 90 | 70 | 90 | N | BB | 70 | 90 | N | 2233476 | 515425 |
| 276 | R2 | 175 | 82 | 265 | 67 | N | BB | 337 | 66 | N | 2232738 | 517226 |
| 277 | R2 | 143 | 62 | 233 | 60 | NW | BB | 284 | 50 | N | 2232738 | 517226 |
| 278 | R3-F26 | 245 | 63 | 335 | 75 | SW | BB | 304 | 59 | N | 2232647 | 515394 |
| 281 | R3 | 230 | 72 | 320 | 90 | N | BB | 320 | 72 | N | 2232647 | 515394 |
| 282 | R3 | 265 | 38 | 355 | 90 | N | BB | 355 | 38 | N | 2232647 | 515394 |
| 283 | R3 | 267 | 72 | 357 | 90 | N | BB | 357 | 72 | N | 2232647 | 515394 |
| 285 | R4 | 65 | 88 | 155 | 85 | NE | BB | 87 | 85 | N | 2232327 | 515590 |
| 292 | R4 | 112 | 88 | 202 | 90 | S | BA | 202 | 88 | N | 2232327 | 515590 |
| 293 | R4 | 318 | 75 | 48 | 60 | SE | BA | 114 | 57 | N | 2232327 | 515590 |
| 294 | R4 | 210 | 90 | 300 | 75 | NE | BB | 30 | 75 | N | 2232327 | 515590 |
| 298 | R4 | 340 | 49 | 70 | 75 | NW | BB | 48 | 47 | N | 2232327 | 515590 |
| 302 | R5 | 238 | 60 | 328 | 46 | E | BB | 31 | 39 | N | 2232264 | 515555 |
| 303 | R6-F30 | 128 | 76 | 218 | 80 | NW | BA | 254 | 73 | N | 2232194 | 515635 |
| 310 | R6 | 166 | 67 | 256 | 70 | NW | BA | 299 | 60 | N | 2232194 | 515635 |
| 311 | R6 | 340 | 89 | 70 | 50 | NW | BB | 341 | 50 | N | 2232194 | 515635 |
| 313 | R8 | 292 | 64 | 22 | 78 | SE | BB | 48 | 62 | N | 2231329 | 515679 |
| 314 | R8 | 98 | 70 | 188 | 70 | SE | BB | 141 | 62 | N | 2231329 | 515679 |
| 320 | R8 | 228 | 57 | 318 | 38 | NE | BB | 25 | 31 | NR | 2231329 | 515679 |
| 321 | R8 | 223 | 65 | 313 | 42 | NE | BB | 22 | 37 | NR | 2231329 | 515679 |
| 322 | R8 | 213 | 64 | 303 | 0 | E | BB | 33 | 0 | L | 2231329 | 515679 |
| 324 | R8 | 240 | 76 | 330 | 35 | NE | BB | 50 | 34 | NR | 2231329 | 515679 |
| 325 | R8 | 295 | 60 | 25 | 65 | SE | BB | 68 | 52 | N | 2231329 | 515679 |
| 326 | R8 | 262 | 86 | 352 | 83 | NE | BB | 52 | 82 | N | 2231329 | 515679 |
| 327 | R8 | 355 | 88 | 85 | 90 | N | BA | 85 | 88 | N | 2231329 | 515679 |
| 328 | R8 | 132 | 77 | 222 | 77 | SE | BA | 176 | 72 | N | 2231329 | 515679 |
| 332 | R8 | 279 | 68 | 9 | 90 | N | BB | 9 | 68 | N | 2231329 | 515679 |
| 333 | R8 | 284 | 61 | 14 | 70 | SE | BB | 51 | 55 | N | 2231329 | 515679 |