



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL**

**“Cartografía, petrogénesis y prospección geoquímica por  
Oro en el intrusivo El Calvario, en el municipio de Jacala  
de Ledesma, Hidalgo, México”**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geólogo Ambiental**

**Presenta:**

**José Antonio Zamorano Téllez**

**Asesores de tesis:**

**Dr. Kinardo Flores Castro**

**Dr. José Luis Cadena Zamudio**

**Pachuca de Soto, Hidalgo, 2011.**

---

---

## **CERTIFICADO DE ASESORES DE TESIS**

Certificamos que la tesis titulada **“Cartografía, petrogénesis y prospección geoquímica por Oro en el intrusivo El Calvario, en el municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo, México”**, presentada por el **C. José Antonio Zamorano Téllez** ha sido realizada por el, durante el periodo Junio 2009 – Diciembre 2010, bajo nuestra dirección.

### **Dr. Kinardo Flores Castro**

Asesor

Profesor – Investigador Titular “C”

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

UAEH

Pachuca, Hidalgo, México

### **Dr. José Luis Cadena Zamudio**

Co – Asesor

Profesor – Investigador Titular “B”

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

UAEH

Pachuca, Hidalgo, México

---

---

---

---

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis:

**A DIOS**

**CON TODO MI CARIÑO A MI FAMILIA**

A mis padres, Celia Téllez Bautista, José Antonio Zamorano Martínez.

A mis hermanos, Pablo y Roberto.

A mis abuelos, Martina Martínez (t), Tomas Zamorano y Juana Bautista.

A todos mis amigos.

Y con mi más especial afecto a la chica que algún día se convierta en mi vida.

---

---



Trabajo publicado durante la elaboración de esta tesis:

**Zamorano-Téllez, J.A., Flores-Castro, K., Cadena, J.L., Hernández, J., Ramírez, M., Magos, E.M., Mendoza, M., 2009.** Prospección Geoquímica Por Oro En El Área De Influencia Del Intrusivo El Calvario, Jacala De Ledesma, Hidalgo, México. Actas INAGEQ 2009.

La presente tesis de investigación fue financiada mediante los proyectos:

Proyecto “Cartografía, petrogénesis y prospección geoquímica por Oro en el intrusivo El Calvario, en el municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo, México”, con número de registro sistema CONACYT: 000000000**105368**. Convocatoria 2008 de Apoyo para Investigadores Nacionales para el Fortalecimiento de Actividades de Tutoría y Asesoría de Estudiantes de Nivel Licenciatura

Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de la Secretaria de Educación Publica (SEP), que financio el Proyecto de Investigación Aplicada aprobado dentro del Marco del Programa de Redes Temáticas Nacionales, denominado: “Estudio bioestratigráfico y geoquímico de la Formación La Casita (Jurásico Superior) del norte – noreste de México: Implicaciones paleoambientales” en el cual participan activamente la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Nacional Autónoma de México que actualmente integran la Red Temática Nacional “Recursos Geoenergéticos Renovables y No Renovables”.

Ambos proyectos permitieron llevar a buen término esta tesis de investigación apoyando con recursos económicos para sufragar la etapa de trabajo de campo y laboratorio.

---

---

## **Agradecimientos**

Me siento profundamente agradecido a todas las personas que se han cruzado en mi vida y que me han inspirado, conmovido e iluminado con su presencia.

Por compartir generosamente su sabiduría, amor y divinidad rindo homenaje a mis padres, pero especialmente a mi mami Celia, gracias por todas tus enseñanzas sobre la vida, tu paciencia, apoyo y comprensión por que nadie mejor que tu sabes lo difícil que soy.

A mis hermanos Pablin y Robert gracias por su cariño y nuestra frase “Impossible is nothing”.

A mis abuelos, tíos, primos y sobrinos por los buenos momentos que hemos pasado juntos y por su cariño.

También quisiera expresar mi reconocimiento y mi gratitud a las siguientes personas por su extraordinario apoyo y sus contribuciones en mi viaje y en la creación de esta tesis:

Agradezco al Dr. Kinardo Flores Castro por su supervisión y apoyo como director y asesor de tesis, además de la confianza y la gran amistad que he brindado a lo largo de todo este tiempo, por su esfuerzo y sobre todo por la paciencia y comprensión que me ha tenido.

Al Dr. Marius Ramírez Cardona por todo el apoyo brindado académica y personalmente, gracias por su gran amistad.

Al Dr. Juanito Hernández Ávila por todas sus enseñanzas durante el servicio social, por su apoyo y sobre todo por la valiosa amistad que siempre me ha brindado.

Al Dr. José Luis Cadena Zamudio por brindarme sus conocimientos en el campo de la prospección minera, así como en técnicas de concentración y de digestión ácida.

---

---

---

Al Dr. Martin Alamilla por su apoyo en las lecturas de Absorción Atómica, sus enseñanzas en la técnica analítica y en la digestión de muestras en medio alcalino, además por brindarme su amistad y confianza.

A la Dra. Paty Montiel por siempre brindarme apoyo y no solo en el ámbito académico sino también por escucharme y brindarme su amistad.

Al Lic. Alfredo Meneses Lugo por todo su apoyo en la elaboración y construcción del sistema de información geográfica, por la confianza y gran amistad que me ha brindado.

A todos y cada uno de los Sinodales por su participación en la revisión de la presente tesis ya que su empeño y tiempo hicieron que mejorara el presente trabajo.

A mis queridos amigos Meli, Adri, Pame, Ruth, Deni, Tete, Misa, Mau, Angélica (Huasca), Pao, Isaac, Kinardo, Marius, Juanito, Alfredo estoy profundamente agradecido con cada uno por la huellas que han dejado en mí en cada momento desde que los conozco, estando cerca y estando distantes, siempre me enseñaron y me ayudaron a formarme como soy ahora. Agradezco cada momento a su lado, todo su cariño y todo lo que les he aprendido en este pequeño viaje.

«Quien no conoce nada, no ama nada. Quien no puede hacer nada, no comprende nada. Quien nada comprende, nada vale. Pero quien comprende también ama, observa, ve... Cuanto mayor es el conocimiento inherente a una cosa, más grande es el amor... Quien cree que todas las frutas maduran al mismo tiempo que las frutillas nada sabe acerca de las uvas» Paracelso.

«Cada uno de tus pensamientos es igual a un objeto real, una fuerza para alcanzar cada uno de tus ideales» J. Antonio Zamorano Téllez.

---

---

---

# **OBJETIVOS**

---

---

### **Objetivo General:**

“Establecer la petrogénesis y evaluación del potencial aurífero de la zona relacionada al intrusivo El Calvario, que se encuentra en el municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo”.

### **Objetivos Específicos:**

1. Diseño de un plano topográfico y geológico de base del área de estudio a una escala conveniente.
  2. Realizar trabajo de campo que permita muestrear los distintos litotipos graníticos de la localidad; así como de estructuras mineralizadas, zonas de contacto y sedimentos de arroyo.
  3. Preparación de las muestras geológicas en laboratorio para estudios petrográficos y de química de roca total: trituración, molienda, pulverizado, tamizado, separación densimétrica, digestión ácida y alcalina.
  4. Análisis químico de elementos mayores y traza de las muestras geológicas por Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Absorción Atómica (AA).
  5. Establecer las clasificaciones de los litotipos graníticos con base en la construcción de diagramas petrológico – geoquímicos y para obtener información petrogenética.
  6. Realizar análisis cualitativo y cuantitativo de oro por AA en las muestras y detectar zonas de anomalía geoquímica.
-

ÍNDICE

PAGINA

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Geoquímica.....	2
1.2. Exploración Geoquímica.....	3
1.3. Rocas Ígneas.....	7
1.3.1. Clasificación de Rocas Ígneas.....	8
1.4. Yacimientos Minerales.....	9
1.4.1. Clasificación de Yacimientos Minerales.....	11
1.4.1.1. Yacimientos de Tipo <i>Skarn</i> .....	14
1.4.1.1.1. <i>Skarn</i> Auríferos.....	17
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>19</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>23</b>
<b>4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
4.1. Localización y Vías de acceso.....	26
4.2. Modelo digital de elevaciones (DEM).....	28
4.3. Fisiografía.....	29
4.4. Geomorfología.....	31
4.5. Hidrografía.....	32

---

4.6. Clima en el municipio de Jacala de Ledesma.....	33
4.7. Vegetación y Suelos.....	34
<b>5. CONTEXTO GEOLÓGICO.....</b>	<b>37</b>
5.1. Geología Regional.....	37
5.2. Geología Local.....	41
<b>6. ESTRATIGRAFÍA.....</b>	<b>47</b>
6.1. Jurásico Superior.....	48
6.2. Cretácico Inferior.....	49
6.3. Cretácico Superior.....	50
6.4. Terciario.....	51
6.5. Cuaternario.....	53
<b>7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....</b>	<b>55</b>
<b>8. METODOLOGÍA.....</b>	<b>59</b>
8.1. Muestreo.....	60
8.2. Técnicas de muestreo.....	60
8.3. Preparación de muestras.....	61
8.4. Química de roca total.....	65
8.4.1. Tecnologías de análisis.....	66
8.5. Geoestadística.....	70
8.6. Cartografía geológica y mapas de isoconcentración.....	74
<b>9. PETROLOGÍA.....</b>	<b>75</b>
9.1. Petrología.....	76

---

---

9.1.1. Petrografía del granitoide de la mina Nuevo Encino Prieto (Muestra JANEP-25).....	76
9.1.2. Petrografía del granitoide del arroyo “El Refugio” (Muestra JAAR – 16).....	79
9.1.3. Petrografía del granitoide de “Santo Domingo” (Muestra JASnDNF – 22).....	83
9.1.4. Petrografía del enclave 1 localizado en muestra JAAR – 16.....	86
9.1.5. Microscopia electrónica de barrido y microscopia de luz reflejada.....	89
<b>10. GEOQUÍMICA.....</b>	<b>93</b>
<b>10.1. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORITARIOS.....</b>	<b>94</b>
10.1.1. Diagramas de Streckeisen para la clasificación de rocas intrusivas.....	94
10.1.2. Diagrama R1 – R2.....	95
10.1.3. Diagrama de clasificación de granitoides de Wilson.....	96
10.1.4. Diagrama de clasificación de rocas plutónicas de La Roche P & Q.....	97
10.1.5. Diagrama A-B de Debon y Le Fort.....	97
10.1.6. Diagrama AFM.....	100
10.1.7. Diagrama de Miyashiro.....	100
10.1.8. Diagrama de Irvine.....	101
10.1.9. Diagrama de Le Maitre.....	101
<b>10.2. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA.....</b>	<b>102</b>
10.2.1. Diagramas Tectonomagmáticos Con Elementos Traza.....	103
10.2.1.1. Diagrama de Harris.....	103
10.2.1.2. Diagramas de Pearce.....	103
<b>10.3 PROSPECCION GEOQUIMICA.....</b>	<b>105</b>

---

10.3.1. Sedimentos en redes de drenaje.....	105
10.3.2. Geoestadística de los sedimentos de arroyo.....	107
10.3.3. Mapa geoquímico.....	111
<b>11. GEOLOGÍA ECONOMICA.....</b>	<b>117</b>
<b>12. CONCLUSIONES.....</b>	<b>126</b>
<b>13. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>131</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>141</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>151</b>
Anexo A.....	152
Anexo B.....	156
Anexo C “Plano Geológico”	

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**Figura 1.1.-** Esferas de la geoquímica.....4

**Figura 1.2.-** Ciclo geoquímico generalizado.....6

**Figura 1.3.-** Esquema de clasificación de rocas ígneas.....9

**Figura 1.4.-** Esquema ilustrativo de un depósito de tipo skarn.....15

**Figura 4.1.-** Mapa de localización y vías de acceso al área de estudio.....27

**Figura 4.2.-** Modelo digital de elevaciones mostrando las zonas de granitoides y pórfidos dentro de la carta San Nicolás F14C59, 1-Barranca Los Marmoles, 2-Arroyo Las Adjuntas, 3-Arroyo Villa Hermosa, 4-Arroyo El Aguacate, 5-Cerro Prieto, 6-Cerro Colorado, 7-Cerro Boludo, 8-Puerto De Vigas, 9-Cerro Cangandhó (2830m), 10-Cerro El Pílon, 11-Barranca Chalma, 12-Arroyo De Flojonales, 13-Puerto La Estancia, 14-Puerto Las Trancas, 15-Valle De San Nicolás, 16-Mesa De La Cebada, 17- Mesa Grande, 18-Cerro La Sierrita, 19-Arroyo Chilcuautila, 20-Cerro La Cruz, 21-Cerro El Caballo, 22-Cerro Bandhó).....28

**Figura 4.3.-** Ubicación del área de estudio dentro del mapa de provincias fisiográficas (Modificado de Raisz, 1964).....30

**Figura 4.4.-** Mapa fisiográfico del Estado de Hidalgo (Modificado de Inegi, 2009)..... 30

**Figura 4.5.-** Panorámica del área de estudio. En primera instancia las formas suaves, ligeramente redondeadas de la granodiorita y en el fondo las calizas masivas de la Formación El Abra.....31

**Figura 4.6.-** Mapa de aguas superficiales y relieve del municipio de Jacala de Ledezma, Hidalgo (modificado de Inegi, 2005).....33

**Figura 4.7.-**Mapa de climas (modificado de Inegi, 2005).....34

**Figura 4.8.-**Uso de suelo en el área de estudio.....35

<b>Figura 4.9.-</b> Vegetación en el área de estudio.....	36
<b>Figura 5.1.-</b> Sección transversal que muestra la geología regional del Estado de Hidalgo, así como su estilo estructural (Suter, 1990).....	40
<b>Figura 5.2.-</b> Morfología actual, Jacala de Ledesma.....	40
<b>Figura 5.3.-</b> Calizas de la Formación El Abra.....	42
<b>Figura 5.4.-</b> Contacto del pórfido con las calizas de la Formación El Abra.....	44
<b>Figura 5.5.-</b> Mineralización en la Mina El Refugio (Principalmente óxidos de Fe (hematita y magnetita), con hasta 4.12 g/ton de oro).....	45
<b>Figura 5.6.-</b> Muestra de mano de la mina La Trinidad (Fe – Cu). Se observan crecimientos botroidales de magnetita (Mt) y brecha mineralizada con malaquita (Ml), crisocola (Cs) y pirita (Pi), cementados por cuarzo (Cz) y calcita (Cc). Escala grafica 10 cm.....	46
<b>Figura 6.1.-</b> Columna estratigráfica del área de estudio (modificada de Flores –Castro, 2001).....	54
<b>Figura 8.1.-</b> Esquema ilustrativo del método del cuarteo.....	61
<b>Figura 8.2.-</b> Mesa Wilfley.....	62
<b>Figura 8.3.-</b> Componentes de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	69
<b>Figura 8.4.-</b> Espectro de rayos X, empleando el MEB.....	70
<b>Figura 9.1.-</b> Granitoide JANEP – 25.....	76
<b>Figura 9.2.-</b> Imagen en luz paralela de la muestra JANEP-25 que muestra un mosaico holocristalino porfídico que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 µm.....	77

<b>Figura 9.3.-</b> Imagen en nicoles cruzados de la muestra JANEP-25 que muestra un mosaico holocristalino porfídico que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 $\mu\text{m}$ .....	77
<b>Figura 9.4.-</b> Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JANEP – 25.....	79
<b>Figura 9.5.-</b> Granitoide JAAR – 16, presencia de un enclave de naturaleza diorítica.....	80
<b>Figura 9.6.-</b> Imagen en luz paralela de la muestra JAAR-16 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 $\mu\text{m}$ .....	81
<b>Figura 9.7.-</b> Imagen en nicoles cruzados de la muestra JAAR-16 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 $\mu\text{m}$ .....	81
<b>Figura 9.8.-</b> Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JAAR – 16.....	82
<b>Figura 9.9.-</b> Granitoide JASnDNF – 22.....	83
<b>Figura 9.10.-</b> Imagen en luz paralela de la muestra JASnDNF-22 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 $\mu\text{m}$ .....	84
<b>Figura 9.11.-</b> Imagen en nicoles cruzados de la muestra JASnDNF-22 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 $\mu\text{m}$ .....	84
<b>Figura 9.12.-</b> Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JASnDNF – 22.....	85

<b>Figura 9.13.-</b> Enclave en el granitoide JAAR – 16. Tamaño aproximado del enclave 5cm.....	86
<b>Figura 9.14.-</b> Imagen en luz paralela de la muestra JAAR-16 e1 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita de reemplazamiento, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 µm.....	87
<b>Figura 9.15.-</b> Imagen en nicoles cruzados de la muestra JAAR-16 e1 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita de reemplazamiento, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala grafica 200 µm.....	87
<b>Figura 9.16.-</b> Diagramas de Streckeisen, 1976 del enclave de la muestra JAAR – 16.....	88
<b>Figura 9.17.-</b> Imagen de luz reflejada que muestra un ejemplo de las brechas mineralizadas en la mina “Nuevo Encino Prieto”. Escala grafica 200 µm.....	89
<b>Figura 9.18.-</b> Imagen de luz reflejada a detalle de los minerales brechificados: pirita (Pi), esfalerita (Esf), calcopirita (Cpi), galena (Ga) y cuarzo (Cz). Escala grafica 100 µm.....	90
<b>Figura 9.19.-</b> Imagen de electrones electrodispersados. Partícula de oro (Au) incluida en una matriz de calcopirita (Cpy). Muestra JANEP – 25 correspondiente a la mina Nuevo Encino Prieto.....	90
<b>Figura 9.20.-</b> Imagen de electrones electrodispersados. Telururos de plata, bismuto y oro que posiblemente correspondan con hessita-matildita-schapbachita. (Hes?) y calaverita (Cv), incluidas en calcopirita (Cpi) de la mina “Nuevo Encino Prieto”.....	91
<b>Figura 9.21.-</b> Espectro de rayos X obtenido por SEM de una partícula mineral incluida en calcopirita, donde se identificó bismuto y telurio, además de oro nativo.....	91
<b>Figura 9.22.-</b> Espectro de rayos X obtenido por SEM de una partícula mineral incluida en calcopirita, donde se identificó telurio y oro nativo.....	92

<b>Figura 10.1.-</b> Diagrama de clasificación de rocas plutónicas de Streckeisen, 1976 aplicado a los granitoides de El Calvario.....	94
<b>Figura 10.2.-</b> Diagrama de clasificación de rocas plutónicas De la Roche, 1980, 1986 aplicado a los granitoides de El Calvario.....	95
<b>Figura 10.3.-</b> Diagrama de clasificación de granitoides de Wilson.....	96
<b>Figura 10.4.-</b> Diagrama de clasificación plutónica P & Q de La Roche, (1964, 1972, 1976, 1978, 1986). Donde gd=granodiorita, <b>mzdq=cuarzomonzodiorita</b> , mzgo=monzodiorita, monzogabro, to=tonalita, dq=cuarzodiorita, mz=monzonita, mzzq=cuarzomonzonita, <b>ad=adamelita</b> , gr=granito, sq=cuarzosienita, s=sienita, go=gabro.....	97
<b>Figura 10.5.-</b> Diagrama A-B de Debon y Le Fort, 1988.....	98
<b>Figura 10.6.-</b> Diagrama AFM, Irvine y Baragar, 1981.....	100
<b>Figura 10.7.-</b> Diagrama de series magmáticas de Miyashiro, 1974.....	100
<b>Figura 10.8.-</b> Diagrama de Irvine et al., 1971.....	101
<b>Figura 10.9.-</b> Diagrama de Le Maitre, 1989.....	102
<b>Figura 10.10.-</b> Diagrama de Harris, 1986.....	103
<b>Figura 10.11.-</b> Diagrama (Y + Nb) & Rb de Pearce et al., 1984.....	104
<b>Figura 10.12.-</b> Diagrama Y & Nb de Pearce et al., 1984.....	104
<b>Figura 10.13.-</b> Esquema representativo de muestreo en redes de drenaje.....	106
<b>Figura 10.14.-</b> Datos de dispersión de valores de Au respecto a la distancia de este a oeste en la zona de estudio (distancia en metros).....	109
<b>Figura 10.15.-</b> Histograma de los contenidos de Au en los sedimentos de arroyo.....	110
<b>Figura 10.16.-</b> Mapa de distribuciones de Au en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa Surfer 9.0, utilizando los valores de anomalía posible, probable y cierta...	113

**Figura 10.16.-** Mapa de distribuciones de Au en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa Surfer 9.0.....114

**Figura 10.17.-** Mapa de distribuciones de Au (líneas negras), geología y escurrimientos superficiales en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa ArcGis 9.3.....115

**Figura 10.18.-** Mapa 3D de distribuciones de Au obtenido en el programa Surfer 9.0 con base en el kriging que se realizó para el mapa de contornos.....116

**Figura 11.1.-** Tendencia de la producción de Au de 1900 a 2006.....123

**Figura 11.2.-** Tendencia del precio de Au por onza el día 22 de marzo de 2011.....124

**Figura 11.3.-** Variación del precio del Au por onza en el último año.....124

**Figura 11.4.-** Variación del precio del Au por onza en los últimos 10 años.....125

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1.-</b> Clasificación de Lindgren de los yacimientos minerales.....	12
<b>Tabla 9.1.-</b> Análisis modal de JANEP.....	78
<b>Tabla 9.2.-</b> Análisis modal de JAAR – 16.....	82
<b>Tabla 9.3.-</b> Análisis modal de JASnDNF – 22.....	85
<b>Tabla 9.4.-</b> Análisis modal del enclave en muestra JAAR – 16.....	88
<b>Tabla 10.1.-</b> Medidas de dispersión.....	108
<b>Tabla AA1.-</b> Clasificación de los depósitos de Skarn en base al metal económico dominante.....	154
<b>Tabla AB1.-</b> Elementos mayores (FRX).....	156
<b>Tabla AB2.-</b> Elementos traza (FRX).....	156
<b>Tabla AB3.-</b> Resultados de absorción atómica de sedimentos de arroyo (izquierda) y rocas (derecha).....	157
<b>Tabla AB4.-</b> Localización de muestras.....	158

---

## RESUMEN

El área de estudio se localiza al noreste del Estado de Hidalgo, en el municipio de Jacala de Ledesma, entre las coordenadas extremas 20°45'–21°00' N y 99°00'–99°20' W. Esta zona se encuentra emplazada en la Sierra Madre Oriental, constituida por pliegues irregulares, generalmente paralelos con orientación NW-SE resultado de la Orogenia Laramide, al sureste de la Plataforma Valles-San Luís Potosí.

El objetivo de este trabajo es la prospección geoquímica por Au y el estudio de las mineralizaciones asociadas al intrusivo El Calvario, tanto en roca, mineral de mena, estructuras y sedimentos de arroyo. La mineralización está relacionada a un *skarn* cálcico (rico en granate) resultado del metamorfismo de contacto–metasomatismo entre roca caliza cretácica de la Formación El Abra y los granitoides del intrusivo El Calvario. En esta área se colectaron 24 muestras, de las cuales 7 son de mineral de mena de la mina El Refugio y las 17 restantes de sedimentos de arroyo pertenecientes al patrón de drenaje con influencia a la mina. La mineralogía de mena en el cuerpo mineralizado en el área de la mina El Refugio, está constituida principalmente por óxidos (hematita) y en menor cantidad sulfuros (pirita y calcopirita) que incorporan especies secundarias de cobre (malaquita y crisocola).

Las muestras con mineral de mena se tomaron *in-situ* sobre el cuerpo mineralizado aflorante. Los sedimentos de arroyo se homogenizaron mediante cuarteo directamente en el sitio de muestreo, recuperando un promedio de 20 kg de arenas y gravas que se embalaron para su transporte al laboratorio. En las instalaciones universitarias se secaron a temperatura ambiente y se volvieron a cuartear para reducir el tamaño de muestra y concentrar valores. Posteriormente se pasaron por la mesa *Wilfley* para separar los minerales densos y concentrarlos nuevamente. Las muestras resultantes de la preparación mecánica, homogenización y concentración se digitaron en medio ácido con HNO<sub>3</sub> - agua regia y también por el método de NaCN, para cuantificar los valores Au y eliminar las interferencias de hierro, para posteriormente ser cuantificados por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA). No se realizó la

---

cuantificación mediante copelación debido a que no se cuenta con un horno que alcance los 600° C para llevar a cabo este método.

La mineralización aurífera en este yacimiento se encuentra asociada con teluros de Au, Ag y Bi en micro-inclusiones observadas al microscopio electrónico de barrido con espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (MEB-EDS) en cristales de calcopirita, con tamaño de partícula del orden de 1 a 1.5  $\mu\text{m}$ .

Los valores de oro obtenidos varían de 25 mg a 0.48 g/ton en sedimentos de arroyo y de 55 mg a 4.12 g/ton en rocas asociadas a la zona de *skarn*. El muestreo de sedimentos de arroyo arroja buenos resultados ya que en la zona de mayor contenido de Au en tales sedimentos, es la zona de la intrusión con mayor ley.

La paragénesis del yacimiento probablemente es AuTe, AgTe, Au-Ag-Bi-Te, la afinidad magmática calcoalcalina alta en K (shoshonítica) es condicionante directa de la presencia de teluros bajo condiciones de baja sulfuración. No podemos definir la paragénesis con exactitud, ya que no se consiguió cuantificar los valores de Telurio.

---

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se realizó en el municipio de Jacala de Ledesma en el Estado de Hidalgo, en la región de “Jacala – San Nicolás – El Refugio – Santo Domingo – Santo Domingo, Nicolás Flores” contenidas en la Carta Geológico – Minera San Nicolás F14C59 escala 1:50,000 editada por la Gerencia de Geología, Servicio Geológico Mexicano, 2001. Posteriormente, con los datos obtenidos y el conocimiento adquirido en campo, se realizó una rectificación cartográfica de los afloramientos de rocas plutónicas y de su encajante metamórfico, originador de los yacimientos minerales metálicos y no metálicos en la zona. Las investigaciones se dirigen hacia la petrogénesis de los granitoides y la evaluación del potencial aurífero en el intrusivo El Calvario.

Este trabajo de investigación aporta información cartográfica de detalle de los afloramientos graníticos, petrogénesis de los granitoides, determinación de las concentraciones de Au en roca, estructuras mineralizadas y sedimentos de arroyo.

### 1.1. Geoquímica

La geoquímica es rama de la geología que se encarga del estudio de la evolución, distribución, migración y dispersión de los elementos químicos a través de las capas de la Tierra. Esta se basa principalmente en el estudio de la abundancia y dinámica de los elementos químicos en minerales, rocas, agua, hidrocarburos, aire, suelo, etc. Esta ciencia puede dividirse en algunas especialidades como son: Geoquímica Inorgánica, Geoquímica Ambiental, Geoquímica Orgánica, Biogeoquímica, entre otras (McSween, 2003). De las cuales la primera es la utilizada en este trabajo de investigación.

La Geoquímica Inorgánica es la rama de la geología encargada del estudio de la distribución de los elementos químicos en la geosfera (corteza continental y oceánica, sedimentos, hidrosfera, atmosfera y meteoritos). Esta rama de la geoquímica se basa en los principios de la química inorgánica y depende de los análisis químicos de roca total (determinación de elementos mayores ( $> 1000$  ppm) y trazas ( $< 1000$  ppm), incluidas las tierras raras), estos obtenidos por técnicas espectrofotométricas como Fluorescencia de Rayos X, Activación Neutrónica, Absorción Atómica y Plasma Inducido Acoplado.

Algunos de los objetivos de la geoquímica son:

- Determinar la abundancia absoluta y relativa de los elementos y sus especies químicas en los diferentes sistemas naturales de la Tierra.
- Establecer la distribución y migración de los elementos en las diferentes partes que conforman la Tierra (litosfera, atmósfera, hidrosfera, biosfera), con el objeto de obtener información sobre los principios que gobiernan la migración y distribución de los elementos (entre los diferentes sistemas naturales).
- Su aprovechamiento para el bienestar social:
  - Prospección de los recursos naturales para el beneficio de la humanidad (oro, plata, cobre, aluminio, petróleo, agua, etc.).
- Determinación de la calidad del ambiente y reconocer los principales procesos para intervenir en la reducción, atenuación y mitigación del impacto ambiental en beneficio de la humanidad.

Mediante los elementos mayores se realiza la clasificación de los granitoides, mientras que con los elementos trazas se pueden identificar la afinidad magmática, discriminación tectónica, etcétera.

## **1.2. Exploración Geoquímica**

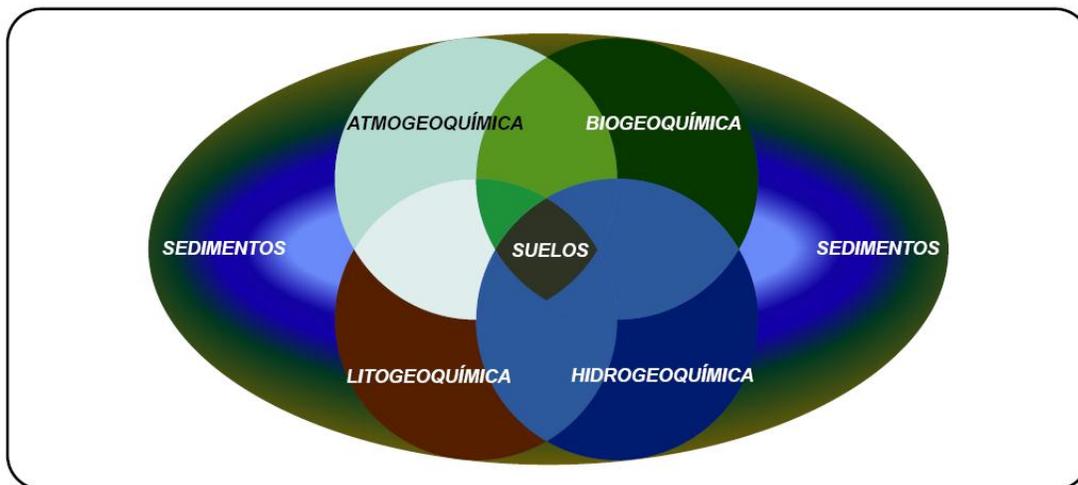
Desde 1945 los progresos en química cuantitativa, que alcanzan la precisión de la millonésima, permiten la prospección de elementos traza en rocas, suelos, agua e incluso en las plantas, dando lugar al nacimiento de la Exploración ó Prospección Geoquímica.

La exploración geoquímica en base a los principios de la distribución y del ciclo de los elementos químicos en la corteza terrestre, la podemos definir como una parte de la Geoquímica Aplicada que tiene como objeto la localización y estudio, en el espacio y en el tiempo, de las anomalías geoquímicas que indican la presencia de:

- Minerales
- Agua
- Combustibles fósiles (hidrocarburos)
- Gestión y análisis de los efectos antrópicos o geoquímica ambiental y epidemogeoquímica.

Boyle, 1979, indica que la prospección geoquímica es la aplicación de los principios y datos geoquímicos y biogeoquímicos, con el fin de detectar yacimientos económicos de minerales, petróleo y gas. Este autor considera que la Tierra, se halla caracterizada mediante 5 esferas, y teniendo en cuenta que un objeto geológico concreto, como el entorno de un depósito mineral, una acumulación de hidrocarburos o un objeto medio ambiental, presentará un incremento de uno o varios elementos, quedando todos reflejados en las esferas.

Puesto que la caracterización de la Tierra se realiza a partir de las 5 esferas y que cada una de ellas, de forma individualizada o en su conjunto, puede ser el reflejo de distintos objetos geológicos. Los distintos tipos de prospección geoquímica se clasificarán a partir de ellas como: Litogeoquímica, Pedogeoquímica (Suelos), Hidrogeoquímica, Atmogeoquímica y Biogeoquímica (Manuel Villadeval, 2008), ver Figura 1.1.



**Figura 1.1.-** Esferas de la geoquímica (Modificada de Villadeval, 2008).

La Exploración Geoquímica se basa en el conocimiento de que un depósito mineral normalmente presenta una "envoltura" de mineralización a su alrededor, y que un patrón de dispersión secundaria de elementos químicos es a menudo originado durante los procesos de intemperismo y erosión del depósito.

El factor fundamental de la exploración geoquímica, es el intento de reconocer algún tipo de anomalía química, la cual puede ser indicativa de mineralización con un valor económico.

Los métodos geoquímicos de exploración están basados en gran parte en el estudio sistemático de la dispersión de elementos químicos, en los materiales naturales circundantes o asociados a depósitos minerales.

La dispersión es el proceso de distribución o redistribución de elementos, causados por agentes físicos y/o químicos. Los procesos de dispersión están relacionados con el ambiente geoquímico, el que está dividido en ambiente geoquímico primario y ambiente geoquímico secundario, que se describen a continuación:

- ❖ ***Ambiente geoquímico primario***: abarca aquellas áreas que se extienden por debajo de los niveles de circulación de aguas meteóricas, hasta aquellos procesos de origen profundo como son el magmatismo y el metamorfismo; las condiciones presentes generalmente son:
  - Temperatura y presión relativamente altas
  - Escasez de oxígeno
  - Limitado movimiento de fluidos
- ❖ ***Ambiente geoquímico secundario***: comprende los procesos superficiales de erosión, formación de suelos, transporte y sedimentación; las condiciones que caracterizan a este ambiente son:
  - Temperatura y presión bajas
  - Presencia abundante de oxígeno libre y otros gases (ejemplo: CO<sub>2</sub>)
  - Flujo de fluidos relativamente libre

El movimiento de materiales que sucede entre los ambientes primario y secundario puede ser representado gráficamente en forma de un sistema cerrado simplificado, conocido como **el ciclo geoquímico** el que se puede definir como la secuencia de estados que ocurren durante la migración de elementos que tiene lugar a medida que suceden los cambios geológicos (Figura 1.2).

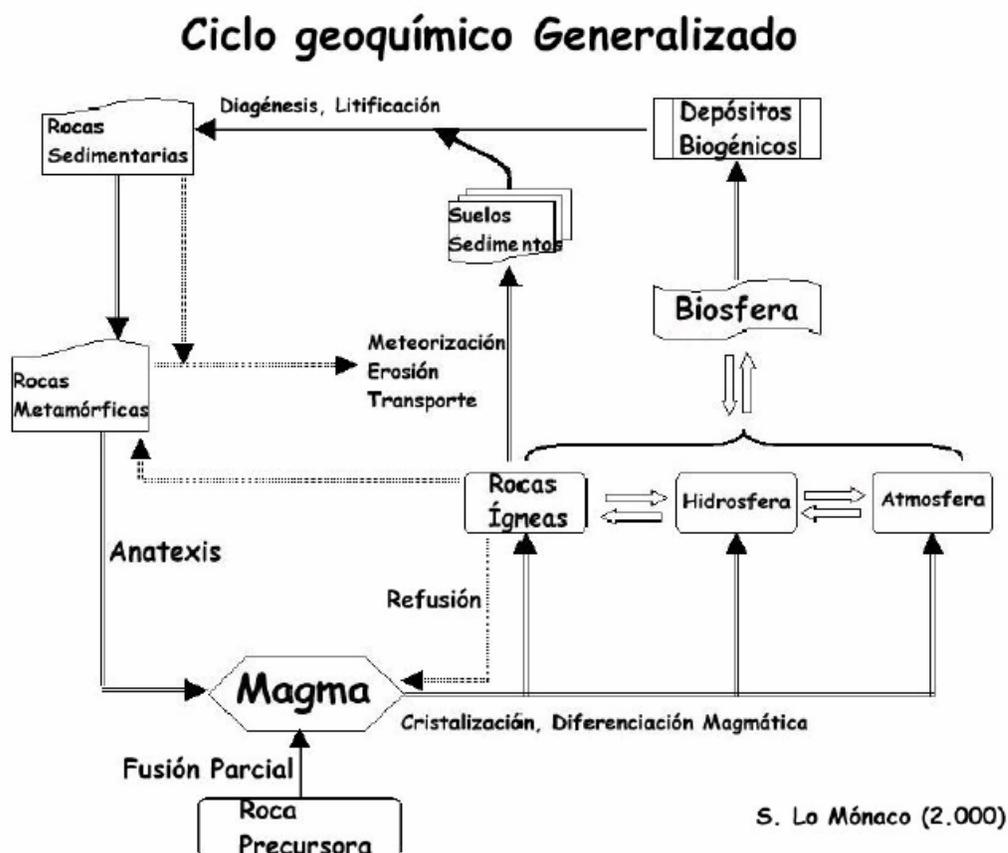


Figura 1.2.- Ciclo geoquímico generalizado.

Las rocas formadas en el ambiente primario pueden alcanzar el ambiente secundario, y muchos cambios pueden resultar por la acción de una gran variedad de procesos geológicos de los cuales los más importantes son el intemperismo, la erosión, sedimentación, diagénesis y la acción biológica.

Los minerales formados bajo condiciones primarias llegan a ser inestables en el ambiente secundario, por lo que suelen ser erosionados, y como resultado los elementos

contenidos en ellos pueden ser liberados, transportados y redistribuidos. Es durante los procesos, que los métodos geoquímicos extremadamente sensibles (a nivel de trazas) son particularmente aplicables, y pueden ser utilizados para encontrar ya sea la fuente primaria de la que provienen dichos elementos libres, o nuevos depósitos minerales resultantes de la redistribución de estos elementos (yacimientos de placer).

### **1.3. Rocas Ígneas**

Las rocas ígneas se forman por la cristalización de un magma; una masa viscosa de silicatos fundidos que se originan en el interior de la corteza terrestre o en el manto superior, donde la temperatura asciende hasta los 700 °C o más, que son las temperaturas necesarias para fundir a la mayoría de las rocas. Cuando el magma se enfría en el interior de la corteza, la pérdida de calor es muy lenta y por lo tanto los cristales que se forman a partir de éste tendrán suficiente tiempo para crecer y formar una roca ígnea de grano grueso (roca plutónica). Sin embargo si el magma es emanado bruscamente hacia la superficie como lo hace un volcán, su enfriamiento y solidificación es muy rápida, y por lo tanto los cristales no tienen tiempo para un crecimiento gradual. En estas circunstancias, se formarán una gran cantidad de pequeños cristales y el resultado final será una roca de grano fino (roca volcánica).

Las rocas ígneas están formadas por cristales, es decir minerales generados por un proceso de cristalización. Eventualmente pueden tener material vítreo; sustancia silicatada no ordenada en un sistema cristalino específico.

De un magma se pueden separar cuatro productos diferentes:

- Los sulfuros líquidos, que requieren un magma rico en azufre y son sólo parcialmente miscibles durante el enfriamiento.
- Los silicatos y óxidos comunes, que originan las rocas ígneas.
- Los componentes gaseosos (volátiles) que escapan arrastrando hacia las paredes ciertos componentes magmáticos.

- La porción residual líquida, fuente de las menas. Los mecanismos de segregación son, la miscibilidad, la cristalización fraccionada y la diferenciación magmática.

### 1.3.1. Clasificación de Rocas Ígneas

Los geólogos distinguen dos grandes subgrupos de rocas ígneas en base al tamaño de sus cristales:

- **Intrusivas o plutónicas.** Son las formadas por la cristalización lenta de un magma, que desde la zona de generación se movilizó y se alojó en otra roca sólida en la corteza. Ellas pueden ser reconocidas fácilmente por su agregado de grandes cristales (la mayoría reconocibles a simple vista) los cuales crecieron lentamente a medida que el magma se enfriaba gradualmente. Como se dijo anteriormente, el enfriamiento lento de magma en el interior de la corteza, es debido a que las rocas encajonantes (rocas que contienen al magma), son por lo general muy malas conductoras del calor, y por lo tanto este se disipa lentamente. Un ejemplo de ellas es el granito.
- **Extrusivas o volcánicas.** Se forman a partir de un enfriamiento muy rápido como el que tiene lugar en una erupción volcánica, donde el magma es lanzado hacia la superficie. Allí, el contraste térmico es muy alto y la disipación del calor es muy rápida, dando lugar a la formación de una roca muy compacta y con cristales muy pequeños rodeados de material vítreo, o solo vidrio. Estas rocas ígneas extrusivas, son fácilmente reconocidas por la presencia del vidrio volcánico, por su textura muy fina o por presentar vesículas producto del escape de gases durante el enfriamiento.

Además para clasificar una roca ígnea debemos conocer su composición mineralógica y la cantidad de cada uno de los minerales esenciales (composición modal), además de su textura, la cual nos dará información sobre la forma en que se enfrió el magma. Con toda esta información es posible darle un nombre específico a cada roca ígnea (Figura 1.3).

Una roca ígnea nos da información sobre qué tipo de material es el que se fundió, y en qué condiciones térmicas se realizó la fusión. Las rocas ígneas son muy buenos indicadores de las condiciones geotectónicas de una región, ya que el tipo de roca ígnea está íntimamente relacionado con el tipo de interacción entre las placas tectónicas.

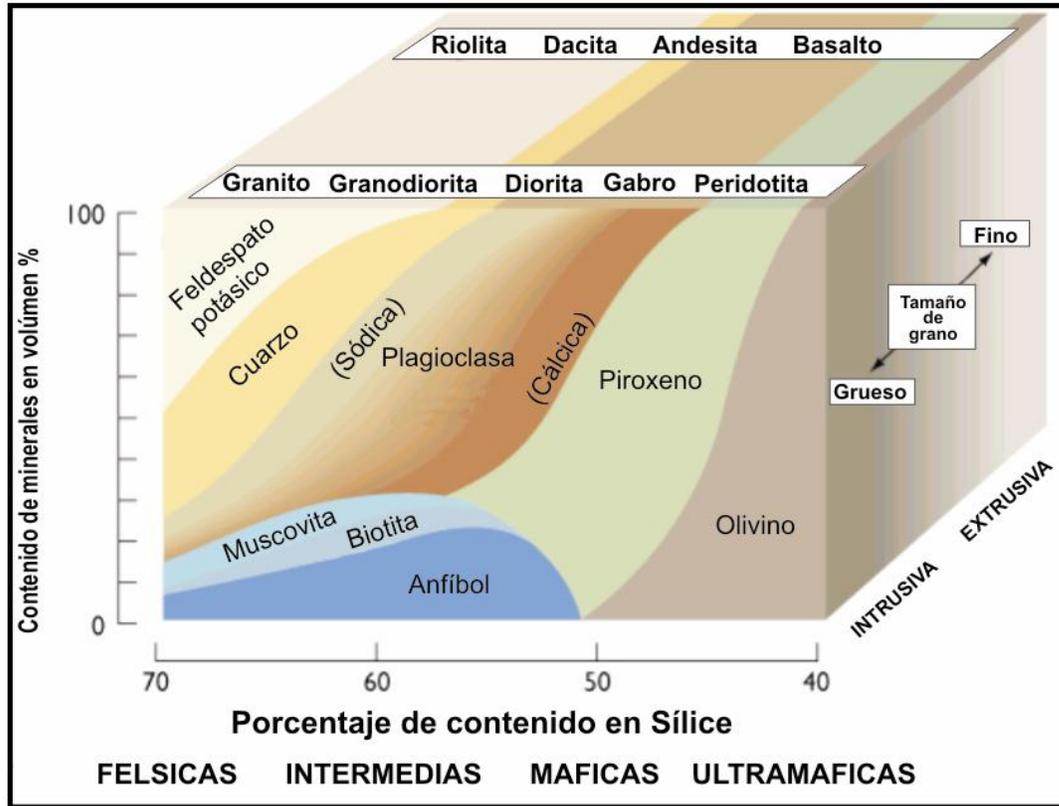


Figura 1.3.- Esquema de clasificación de rocas ígneas.

#### 1.4. Yacimientos Minerales

Los elementos químicos que componen nuestro planeta están distribuidos de una forma que a grandes rasgos es muy regular (bajas leyes), ya que depende de dos grandes factores:

- Su abundancia en cada una de las capas que componen el planeta.
- La naturaleza y composición de las rocas presentes en cada sector concreto que analicemos.

Sobre la base de los datos conocidos sobre la naturaleza y composición geoquímica, mineralógica y petrológica de las diferentes capas en que está dividido nuestro planeta, la composición es simple y homogénea en la zona más profunda (núcleo), e intermedia en el manto, mientras que en la corteza presenta una composición más compleja y heterogénea. Esto último se debe a dos factores:

- El hecho de que la diferenciación planetaria haya producido un enriquecimiento relativo de esta capa en los elementos más ligeros, que no tienen cabida en los minerales que componen el manto, que son de composición relativamente simple: fundamentalmente silicatos de Mg y Fe. Eso hace que con respecto al manto, la corteza sólo esté empobrecida en elementos como Fe y Mg (en lo que se refiere a elementos mayoritarios) y Ni, Cr, Pt en lo que se refiere a trazas.
  
- La mayor complejidad de los procesos geológicos que operan en la corteza producen fenómenos muy variados de enriquecimiento o empobrecimiento de carácter local, que afectan a la concentración de los distintos elementos químicos de diferentes formas.

De esta manera, podemos entender a la corteza como aquel segmento de nuestro planeta en el que se rompe la homogeneidad de la distribución de los elementos que encontramos en capas más profundas. Así, en ésta podemos observar rocas ígneas que independientemente de su lugar de origen (manto astenosférico, manto litosférico, corteza) van desde composiciones peridotíticas hasta las graníticas.

Los procesos que llevan a la diferenciación de un magma, o a la formación de una roca sedimentaria o metamórfica implican en ocasiones transformaciones profundas químico – mineralógicas. Es durante el curso de esos procesos que algunos elementos o minerales pueden concentrarse selectivamente, muy por encima de sus valores "normales" para un tipo determinado de roca, dando origen a concentraciones "anómalas" que denominamos **"Yacimientos Minerales"**.

Es muy importante considerar el aspecto geoquímico ya que todos los elementos químicos están distribuidos en la corteza de forma muy amplia, aunque en general su concentración en las rocas es demasiado baja como para permitir que su extracción de las rocas resulte económicamente rentable. Su concentración para dar lugar a un yacimiento mineral se produce como consecuencia de algún proceso geológico (ígneo, sedimentario ó metamórfico) que provoca la concentración del elemento. Por ejemplo, el oro que se encuentra concentrado en los yacimientos sedimentarios de tipo placer puede proceder del

oro disseminado en áreas de gran extensión regional. En esas áreas el oro estará presente en las rocas, pero en concentraciones demasiado bajas como para poder ser extraído con una rentabilidad económica. Sin embargo, el proceso sedimentario produce su concentración en los aluviones o en playas, posibilitando en algunos casos su extracción económica.

En definitiva, para que un elemento sea explotable en un yacimiento mineral, su concentración debe ser muy superior a su concentración media (*Clark*) en la corteza terrestre.

El otro factor importante a considerar es el económico, ya que esas concentraciones podrán ser o no de interés económico, lo que delimita el concepto de “**Yacimiento Explotable ó No Explotable**”, en función de factores muy variados, entre los que destacan algunos como el valor económico del mineral o minerales extraídos, su concentración o ley, el volumen de las reservas, la proximidad de puntos de consumo, la evolución previsible del mercado, etc..

Esta conjunción de factores geológicos y económicos hace que el estudio de los yacimientos minerales sea una cuestión compleja y problemática, en la que hay que conjugar la labor de especialistas de distintos campos, ya que incluye desde las cuestiones que afectan a la prospección de estas concentraciones, su evaluación, el diseño y seguimiento de su explotación minera, el estudio de la viabilidad económica de la explotación, el análisis del mercado previsible del producto, hasta factores políticos (estabilidad económica y social del país) o cuestiones medioambientales, como la recuperación de los espacios afectados por la explotación.

Por lo cual en base a todos los factores expuestos anteriormente definimos un yacimiento mineral como una ocurrencia mineral (concentración anómala de un mineral o elemento metálico o no metálico) de tamaño (volumen) y ley suficiente para que en circunstancias favorables, sea considerado con potencial económico.

#### **1.4.1. Clasificación de Yacimientos Minerales**

Lindgren introdujo su sistema de clasificación (tabla 1.1) en 1913; se usa hoy en día casi en su forma original. Se han añadido términos tales como "teletermal" (Graton, 1933) y

"exothermal" (Buddington, 1935). Ridge en 1968 reconoció la necesidad de revisión, conservando los principios básicos de Lindgren.

El sistema de Lindgren está considerado como el mejor para uso en el campo. Una modificación que parece esencial es una atenuación del papel del magma. Por consiguiente el origen del calor no se especifica. El término "hidrotermal" significa simplemente "agua caliente" y no implica asociación magmática. Tal cambio en el sistema de clasificación fue sugerido por Williams y se adapta bien con los descubrimientos de los estudios isotópicos y de inclusiones fluidas.

Las denotaciones de temperatura y presión en el esquema de Lindgren son a lo más solamente aproximadas y sujetas a modificación constante. Por ejemplo, aunque la mayor parte de la metalización en los yacimientos mesotermales tiene lugar posiblemente entre los 300° y 200° C, los estados iniciales y finales de la deposición mineral pueden pasar de estos límites.

**Tabla 1.1.-** Clasificación de Lindgren de los yacimientos minerales.

I. Yacimientos producidos por procesos mecánicos de concentración (temperatura y presión moderadas).	
II. Yacimientos producidos por procesos químicos de concentración (temperatura y presión variables entre amplios límites).	
A. En cuerpos de aguas superficiales.	
1. Por interacción de soluciones.	
a) Reacciones inorgánicas. b) Reacciones orgánicas.	Temperatura: 0 a 70°C Presión: moderada a fuerte
B. En cuerpos de rocas.	
1. Por concentración de sustancias contenidas en el cuerpo geológico mismo.	
a) Concentración por desintegración de las rocas e intemperismo residual cerca de la superficie.	Temperatura: 0 a 100°C Presión: moderada
b) Concentración por aguas subterráneas de circulación más profunda.	Temperatura: 0 a 100°C Presión: moderada

<p>c) Concentración por metamorfismo dinámico y regional.</p>	<p>Temperatura: hasta 400°C Presión: alta</p>
<p>2. Concentración efectuada por introducción de sustancias extrañas a la roca.</p> <p>a) Origen independiente de la actividad ígnea.</p> <p>— Por circulación de agua atmosférica a profundidades someras o moderadas.</p> <p>b) Origen independiente de la erupción de rocas ígneas.</p> <p>— Por soluciones ascendentes calientes de origen incierto, pero cargadas de emanaciones ígneas.</p> <p>1. Depositación y concentración a profundidades someras. Yacimientos epitermales.</p> <p>2. Depositación y concentración a profundidades intermedias. Yacimientos mesotermales.</p> <p>3. Depositación y concentración a gran profundidad o a temperaturas y presiones altas. Yacimientos hipotermales.</p> <p>— Por emanaciones ígneas directas.</p> <p>1. <b>A partir de cuerpos intrusivos. Yacimientos de metasomatismo de contacto o pirometasomáticos.</b></p> <p>2. A partir de cuerpos efusivos. Fumarolas y sublimados.</p>	<p>Temperatura: hasta 100°C Presión: moderada</p> <p>Temperatura: 50 a 200 °C Presión: moderada</p> <p>Temperatura: 200 a 300 °C Presión: alta</p> <p>Temperatura: 300 a 500 °C Presión: muy alta</p> <p>Temperatura: 500 y 800°C Presión: muy alta</p> <p>Temperatura: 100 a 600°C Presión: atmosférica</p>

c) En magmas, por proceso de diferenciación.	
1. Yacimientos magmáticos s.st.(de segregación magmática).	Temperatura: 700 a 1 500 °C Presión: muy alta
2. Pegmatitas.	Temperatura: alrededor de 575 °C Presión: muy alta

Cabe mencionar que ninguno de estos criterios es infalible; debido a la complejidad y variabilidad de los factores involucrados, los minerales que normalmente se forman en una zona también se forman en otros lugares, a presiones y temperaturas más altas o más bajas. Las zonas deposicionales se caracterizan por ciertas asociaciones de minerales de mena y minerales de ganga, así como por la presencia de ciertos productos de alteración de la roca encajante (Schneiderhöhn, 1941; Niggli, 1929).

#### 1.4.1.1. Yacimientos de Tipo *Skarn*

El término *skarn* fue introducido por petrólogos metamórficos suecos para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe derivados de un protolito de calizas y dolomitas en las cuales se han introducido metasomáticamente grandes cantidades de Si, Al, Fe y Mg, a partir de una intrusión ígnea.

De modo que se entiende por *skarn* rocas que contienen minerales calcosilicatados, como por ejemplo: diópsido, wollastonita, granate andradita y actinolita. Estas comúnmente ocurren en aureolas de metamorfismo de contacto, entorno a plutones que intrusiónan secuencias calcáreas.

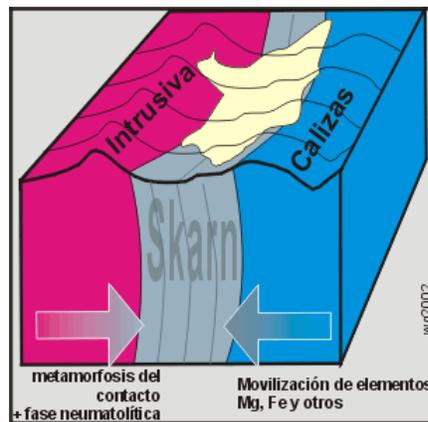
A este tipo de rocas metamórficas se asocia un variado grupo de depósitos minerales extremadamente irregulares, los que pueden formar lenguas de mena que se extienden a lo largo de cualquier estructura planar (estratificación, diaclasas, fallas, etc.) y su distribución dentro de la aureola de contacto de un intrusivo es a menudo irregular. Los cuerpos de mena pueden terminar abruptamente con cambios en la estructura.

Los depósitos de tipo skarn han sido denominados también:

- Metamórficos hidrotermales.
- Metamórficos ígneos.
- Metamórficos de contacto.
- Pirometasomáticos (Lindgren, 1922).

Sin embargo, el término *skarn* es ampliamente utilizado y es adecuado para referirse a este tipo de depósitos relacionados a aureolas de contacto de intrusiones dentro de secuencias calcáreas (Figura 1.4).

Estas últimas rocas formadas por calcita o dolomita ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) se convierten en mármoles, rocas córneas calcosilicatadas (hornfels) y/o skarns por el efecto del metamorfismo de contacto.



**Figura 1.4.-** Esquema ilustrativo de un depósito de tipo skarn.

La producción principal de depósitos de tipo *skarn* incluye: **Fe, Cu, W, C (grafito), Zn, Pb, Mo, Sn, U, Au, Ag, Te, Bi, granate, talco y wollastonita.**

El metamorfismo de contacto afecta a las rocas encajonantes, pero es frecuente que la intrusión también sufra efectos metasomáticos. Esto resulta en una zonación de *endoskarn* (minerales calcosilicatados dentro del intrusivo) y *exoskarn* (*skarn* en las rocas calcáreas). El *endoskarn* ocurre principalmente en la periferia de los plutones intrusivos donde el flujo de fluidos fue hacia adentro del plutón o paralelo al contacto de éste, pero usualmente están

ausentes en las cúpulas de intrusiones con mineralización de tipo pórfido debido a que domina el flujo ascendente de los fluidos provenientes del plutón.

La formación de depósitos de tipo *skarn* involucra esencialmente tres etapas:

**1) Metamorfismo isoquímico:** Recristalización metamórfica y cambios mineralógicos reflejando el protolito y circulación de fluidos a alta temperatura formando minerales calcosilicatados. Incluye además el desarrollo de: mármol, rocas córneas, cuarcitas, *skarn* de reacción, skarnoides, talco y wollastonita hacia la periferia.

**2) Etapas múltiples de metasomatismo:** Cristalización del magma y liberación de una fase fluida produciendo *skarn* metasomático. Se forman principalmente minerales anhidros por acción de fluidos de derivación magmática a temperaturas de 400° - 800°C. Usualmente en esta etapa ocurre o comienza la mineralización.

**3) Alteración retrógrada:** Enfriamiento del plutón y circulación de aguas de temperatura más baja, posiblemente meteóricas, oxigenadas, causando alteración retrógrada de los minerales calcosilicatados metamórficos y metasomáticos. En esta etapa se forman nuevos minerales hidratados de temperatura más baja, a partir de los minerales anhidros formados previamente. Incluyen: epidota, actinolita, clorita y otras fases minerales hidratadas, típicamente con control estructural y sobreimpuestos a la secuencia de progrado (fallas, contactos estratigráficos o intrusivos). En algunos casos la mineralización se extiende también a esta etapa de retrogrado.

Los depósitos minerales de tipo *skarn* son yacimientos de reemplazo metasomático caracterizados por la presencia de minerales calcosilicatados de grano grueso de Ca, Fe, Mg y Mn.

Reemplazan selectivamente a rocas carbonatadas y pueden asociarse con mineralización metálica de **W, Cu, Zn, Pb, Sn, Fe-Ca** y en menor proporción **Au-Ag**.

#### 1.4.1.1.1. *Skarn Auríferos*

Los *skarns* auríferos fueron introducidos como una clase diferente de depósitos minerales hasta 1987. Este tipo de depósitos minerales no están clasificados en base a la combinación de minerales que los forman, tanto de metálicos como de los silicatos en sub-ganga, ni en base al ambiente geológico en el que se depositaron, sino que su definición se basa en sus aspectos económicos. El boletín 1930 del USGS (Servicio de Investigación Geológica de los E.U.A.) publicado a principios de 1991, define a los *skarns* auríferos como aquellos *skarns* con contenidos de 1 gramo o más por tonelada. Se reconocen dos sub-tipos de *skarns* auríferos: *gold skarns* (*Skarns* auríferos propiamente dichos) y los *By-Product gold skarns* (*Skarns* con oro como sub-producto). Los depósitos del sub-tipo “*gold skarns*” son aquellos en los cuales el oro es el único mineral económicamente recuperado, o al menos predominante. Mientras que los *skarns* del sub-tipo “*by-product*” son aquellos que se explotan principalmente para extraer minerales básicos ferrosos, pero que también contienen un gramo o más de oro. La mayoría de los “*by-product gold skarns*” conocidos son de cobre, pero también algunos *skarns* de hierro o zinc presentan contenidos de un gramo o más de oro, y por lo tanto considerados como *skarn* auríferos (Meinert, 1989).

El oro en *skarns* se encuentra asociado con minerales opacos que fueron introducidos en el *skarn* posteriormente a la etapa “*prograde*” de la formación del *skarn*. El oro puede aparecer libre, aunque es más común encontrarlo como inclusiones microscópicas en minerales de sulfuros. El oro es generalmente invisible, por lo que muchos *skarns* auríferos no han sido descubiertos. En *skarns* ferrosos el oro tiende a concentrarse en lugares donde abundan los sulfuros, normalmente en las partes de *skarn* enriquecidas en pirita y calcopirita (caso de este estudio).

Los *skarns* auríferos presentan una geoquímica con enriquecimiento general en As, Bi y Te en comparación con otros tipos de *skarn*; sin embargo la combinación de elementos trazas encontrados junto con el oro en *skarns* auríferos, es bastante variable y no es tan determinante para su localización como lo es el caso de la combinación de elementos trazas asociada con depósitos de oro de tipo epitermal. En *skarns*, el mejor elemento geoquímico que sirve como guía para explorar por oro es probablemente el oro mismo. La presencia de

teluros en los skarns es una característica determinante de los skarns auríferos, especialmente si va acompañado con bismuto, los teluros generalmente son de plata y plomo.

El oro se presenta más comúnmente en skarns formados en ambientes de reducción que en los formados en ambientes de oxidación. Al usar los términos de reducción y oxidación, se refiere a las condiciones de formación. Una forma de indicar las condiciones de reducción en un skarn es con el ratio de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ . En términos más prácticos, los skarns reducidos presentan piroxenos de colores más oscuros (hedenbergita) y por la presencia de pirrotita, arsenopirita, teluros, bismuto nativo, y por cantidades menores de calcopirita y pirita (McAnulty, 1991).

# 2. ANTECEDENTES

## 2. ANTECEDENTES

Algunas de las técnicas de prospección geoquímica, son tan antiguas, que se remontan a la prehistoria con los primeros descubrimientos de gemas y de oro mediante la técnica de prospección de sedimentos a la batea (estilo gambusino). No obstante, fueron los griegos y principalmente los romanos los que institucionalizaron el método como sistemático para la prospección de oro y otros metales. No es hasta el final de la Edad Media y principios del Renacimiento, cuando nos presenta ciertas indicaciones hidroquímicas y geobotánicas al relacionar la presencia de metalizaciones, por los efectos tóxicos que los metales disueltos en el agua le producían a las plantas y el deterioro del ambiente en general.

En el siglo XX, los métodos y técnicas en prospección geoquímica, tienen su origen principalmente en la antigua URSS. Goldsmidt et al., 1920 determinaron la estructura de un gran número de minerales comunes, estableciendo principios de su distribución en la naturaleza, siendo la mayor aportación hasta ese entonces. Posteriormente en los países escandinavos Vernadsky, 1924, Fersman, 1934, mediante sus trabajos de determinación de aureolas primarias y secundarias, y los primeros trabajos sobre biogeoquímica y geobotánica. El desarrollo de técnicas analíticas de mejor sensibilidad tales como la colorimetría, fluorescencia de Rayos X, etc., así como métodos analíticos de extracción selectiva en la década de los 30, puso los cimientos de la moderna prospección geoquímica.

El gran desarrollo alcanzado a partir de 1945 se debe, por una parte a las perspectivas de desarrollo y demanda de la industria de una gran variedad de metales, que los yacimientos activos no podían satisfacer a medio y largo plazo sobre la demanda de estos, y por otra parte al desarrollo de materiales de laboratorio tales como polietileno, resinas intercambiadoras, etc., que permitían un mejor muestreo y análisis.

Un mejor desarrollo en las técnicas analíticas tanto en lo referente a niveles de detección como en rapidez en la obtención de datos, tales como la EAA; EE; INAA; ICP-OS e ICPMS; FRX; Electrodo Específico; Colorimetría; Fluorimetría; Cromatografía de gases, etc.; así como el desarrollo de técnicas informáticas que permitían una mejora en calidad y una mayor rapidez en los tratamientos estadísticos.

La zona en cuestión ha sido objeto de estudios por parte de diversos investigadores e instituciones, entre los trabajos más relevantes, destaca la información generada por el Consejo de Recursos Minerales y la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre los que se encuentran: Crespo, 1875 publica un informe sobre los criaderos argentíferos y platiníferos de Santa María de los Alamos; Elvir, 1961, y Huitrón, 1979, hacen reconocimientos geológicos al ex-distrito minero de Jacala; Suter, 1980, publica "Tectonics of the external part of the Sierra Madre Oriental Foreland Thrust and Fold Belt between Xilitla and the Moctezuma River"; En la prospección minera Guerra, 1983, realiza una visita de reconocimiento en el área de Humboldt-Santa Sofía; Suter, 1990, presenta la geología de la hoja Tamazunchale, estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí; Moreira, et al., 1996, lo hace con la hoja Ciudad Valles F14-8 estados de San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo y Veracruz; Suter, et al. 1997, Structure of the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in the east-central México, Guzmán, et al. 1998, realizan el estudio geológico-minero del lote El Encino, municipio de Jacala, y Berrocal, et al., 1998, efectúan polarización inducida, resistividad y magnetometría terrestre del mismo lote.

Es importante señalar que probablemente desde el tiempo de la Colonia ya se tenía conocimiento de los depósitos minerales del tercer distrito minero en las localidades de Jacala y San Nicolás pero no fue sino hasta el año de 1905 cuando se iniciaron los primeros trabajos mineros de exploración y explotación en gran escala, efectuados por la compañía norteamericana "Cortes Mine Associated" esta compañía trabajó hasta el año de 1910 en que tuvo que suspender definitivamente sus operaciones mineras a consecuencia de la Revolución Mexicana. Durante el tiempo que permaneció en Jacala la "Cortes Mine Associated" se desarrollaron más de 2,500 m lineales de cuele entre cruceros, frentes y tiros. Entre ellos destaca el desarrollo de El Socavón Cortés que presenta una longitud aproximada de 800 m (con rumbo N 55°.E), hasta comunicarlo con los tiros San Antonio y La Abeja así como con El Socavón La Prieta. En 1983, Guerra M. O., documenta la mineralización presente en el distrito de Jacala, describiéndola en forma de cuerpos de remplazamiento metasomático; en chimeneas, mantos y en menor proporción vetas, las cuales son producto de un hidrotermalismo tardío.

Los estudios más recientes realizados en el área de estudio son acerca de los diversos litotipos graníticos (cuarzomonzodiorita–monzonita–cuarzodiorita) del Eoceno (magnesiohornblenda  $\sim 49 \pm 1$  Ma, biotita  $\sim 51 \pm 1$  Ma) (Flores-Castro, 2001), que intrusionan las secuencias calcáreas y calcáreo-pelíticas mesozoicas, produciéndoles metamorfismo de contacto y metasomatismo (Flores-Castro *et al.*, 2006). Además de estudios de prospección geoquímica en El Intrusivo El Calvario localizado en la región del área de estudio (Zamorano *et al.*, 2009).

En cuanto a los telururos de oro y su posible relación con adakititas, solo existen algunos trabajos como los de Pals *et al.*, 2003, acerca de la distribución y depositación de los telururos y el oro a nivel micrométrico, mediante la utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM); trabajos sobre los ensambles de bismuto – telurio – oro efectuados por Oberthur *et al.* 2008; mientras que en 2007 Richards *et al.*, realizo estudios sobre el rol que tienen las adakititas en la metalogénesis; estudios sobre la relación de magmas calcoalcalinos ricos en potasio, que van desde el campo adakitico hasta el de arco de islas (Pinto – Linares *et al.*, 2008).

En cuanto al método de prospección, Viladevall, 2005 lo define como el más usado en cualquier campaña de prospección geoquímica a nivel estratégico, basa su principio en la respuesta geoquímica de los elementos como estadio final de su evolución dentro del ciclo geoquímico.

# 3. JUSTIFICACIÓN

### 3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la geoquímica inorgánica es una herramienta ampliamente utilizada en estudios de prospección geológico - minera, ya que aporta información valiosa, a un relativo bajo costo, en comparación con otros métodos; como por ejemplo, la perforación a diamante.

Por otra parte, la geoquímica inorgánica permite nombrar y discriminar contexto tectónico de rocas ígneas a partir del análisis de elementos mayores y traza, así como identificar patrones de distribución en la corteza.

Con respecto a este trabajo, la importancia de la implementación de la geoquímica inorgánica estriba en poder realizar un estudio prospectivo en el área de influencia del intrusivo El Calvario y conocer los valores y distribución de oro tanto en las rocas plutónicas, en el skarn, roca encajante y en los sedimentos de arroyo relacionados al patrón de drenaje del área de estudio.

Además de cuantificar los valores de Au, Fe, Cu y Zn, éste trabajo aportará información relacionada a la petrogénesis de los granitoides en cuestión y su nomenclatura con base en diagramas de discriminación vigentes.

Es importante señalar que la región que involucra el área de estudio pertenece al Tercer Distrito Minero del Estado de Hidalgo, sin embargo los estudios existentes son regionales o bien generales, por lo que se considera que este es el primero en su tipo desarrollado en el entorno del Intrusivo El Calvario.

En la actualidad los precios por onza de oro han tenido un incremento (1470 dólares/onza) lo cual hace relevante la exploración y el estudio de proyectos abandonados cuando dicho metal tenía un coste por onza mucho menor al actual; así bien por el mismo motivo la exploración para nuevos proyectos de extracción se hace más atractiva.

La exploración por oro y en virtud de la factibilidad de extraer dicho metal, la explotación de minas antiguas y zonas hasta entonces ignoradas podrían apoyar al desarrollo económico del Estado de Hidalgo, así como el del municipio de Jacala.

# 4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

## 4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

### 4.1. Localización y Vías de acceso

El área de estudio se localiza en la porción noreste del Estado de Hidalgo, en el municipio de Jacala de Ledesma. La zona se encuentra delimitada por las coordenadas geográficas 20°45' – 21°00' de latitud Norte y 99°00' – 99°20' de longitud Oeste (Figura 4.1).

El municipio de Jacala colinda al norte con el Estado de Querétaro, al sur con el municipio de Nicolás Flores, al oeste con Pacula y Zimapán, y al este con La Misión y Tlahuiltepa.

El acceso al área de estudio tiene como vías de comunicación más importantes, la carretera federal No. 85 que enlaza las localidades de Pachuca, Hgo., Ixmiquilpan, Hgo. y Tamazunchale, S.L.P. Así como algunos caminos estatales pavimentados parcialmente y otras vías de terracería municipales como las de Pisaflores – Agua Zarca – Tangojé, Jacala – Pacula, Puerto de Piedra – Cerro Prieto – San Cristóbal, La Misión – La Soledad y el de Cuesta Colorada – El Naranjo.

El acceso principal hacia el área de estudio se efectúa partiendo de Pachuca por la carretera federal No.85 (Mexico – Laredo). En el kilómetro 265 se ubica el poblado de Jacala, cabecera municipal del mismo nombre, pasando por los municipios de Actopan, Ixmiquilpan, Tasquillo y Zimapán (Figura 4.1). De Jacala al municipio de San Nicolás se recorre aproximadamente una distancia de 5 km por una carretera pavimentada que es transitable todo el año, llegando a este poblado se toma una terracería que nos lleva a los poblados de El Refugio y Octupilla, donde se toma la desviación para El Refugio.

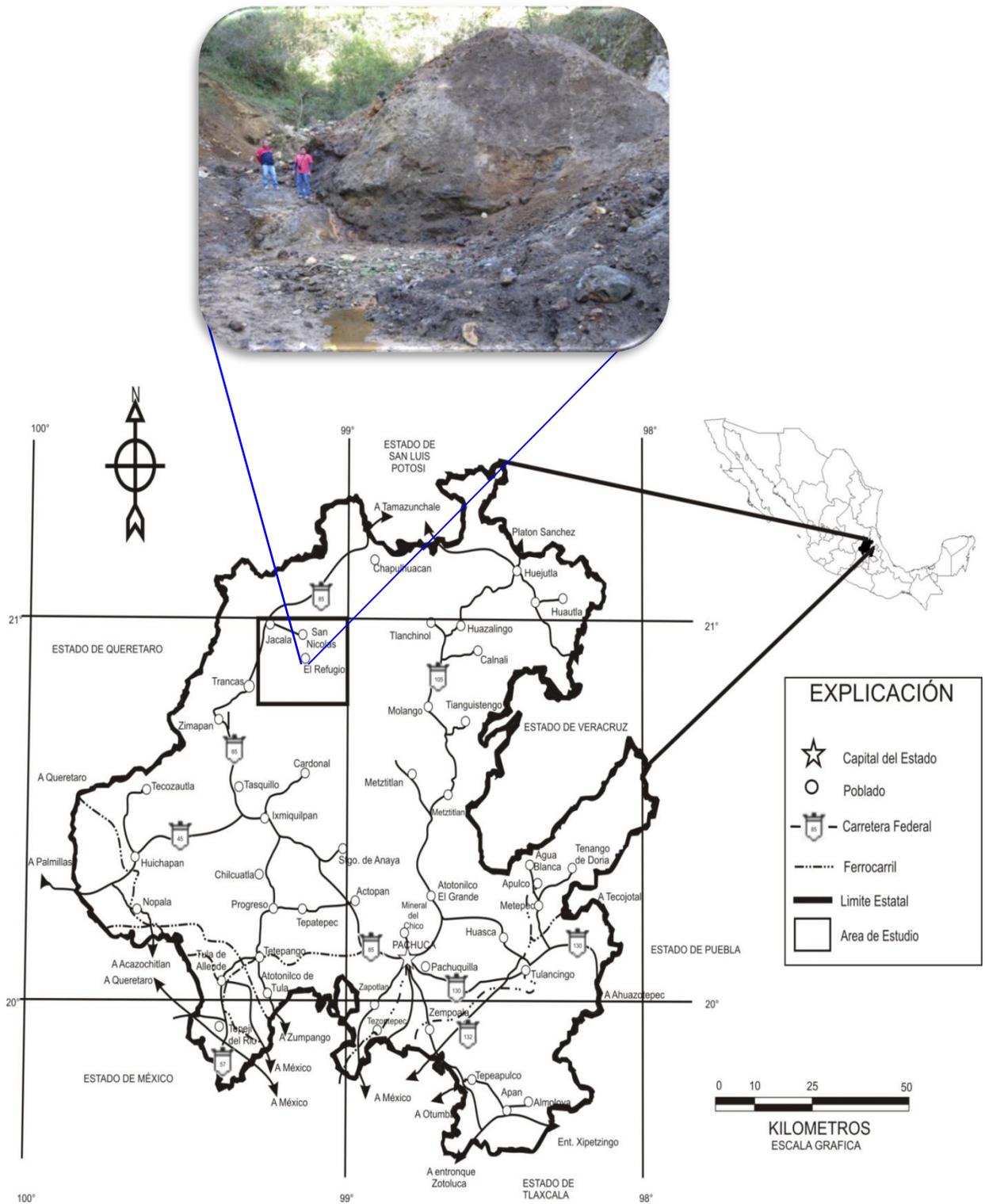
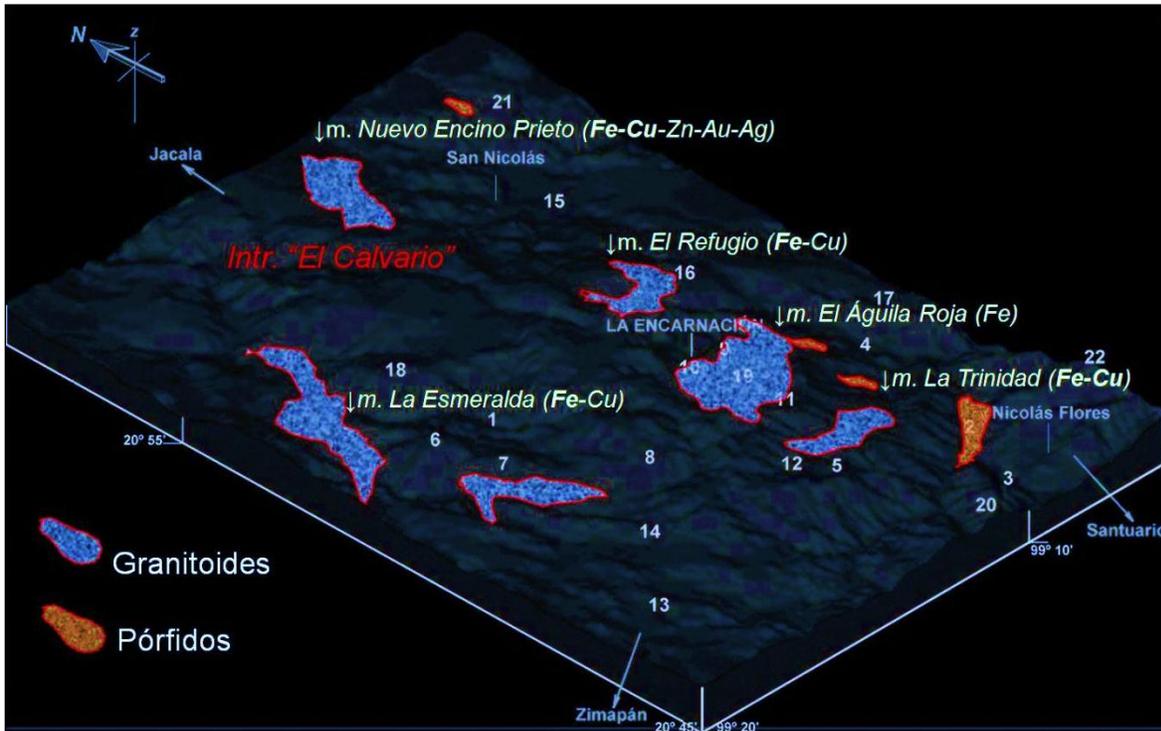


Figura 4.1.- Mapa de localización y vías de acceso al área de estudio.

#### 4.2. Modelo digital de elevaciones (DEM)

En el siguiente grafico se ilustra el modelo digital de elevaciones de la carta San Nicolás, se pueden observar a grandes rasgos, aspectos morfológicos del terreno y localización de toponimia, que no se incluye en la cartografía geológica, además de situar las zonas de granitoides y pórfidos (Figura 4.2).



**Figura 4.2.-** Modelo digital de elevaciones mostrando las zonas de granitoides y pórfidos dentro de la carta San Nicolás F14C59, 1-Baranca Los Marmoles, 2-Arroyo Las Adjuntas, 3-Arroyo Villa Hermosa, 4-Arroyo El Aguacate, 5-Cerro prieto, 6-Cerro Colorado, 7-Cerro Boludo, 8-Puerto De Vigas, 9-C. Cangandhó (2830m), 10-Cerro El Pilón, 11-Barranca Chalma, 12-Arroyo De Flojonales, 13-Puerto La Estancia, 14-Puerto Las Trancas, 15-Valle De San Nicolas, 16-Mesa De La Cebada, 17- Mesa Grande, 18-Cerro La Sierrita, 19-Arroyo Chilcuautla, 20-Cerro La Cruz, 21-Cerro El Caballo, 22-Cerro Bandhó.

### 4.3. Fisiografía

El área de estudio se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Oriental (Figura 4.3), se caracteriza por diversos sistemas montañosos alargados de orientación NW-SE y en menor proporción N-S, los cuales son disectados profundamente por efecto de la disolución del carbonato de calcio, lo que le imprime una particularidad muy notoria al terreno, y que caracteriza a la subprovincia denominada “Carso Huasteco” (Figura 4.4), formada por cadenas orográficas tectonizadas de rocas sedimentarias eminentemente marinas, que se encuentran plegadas y separadas por estrechos valles longitudinales casi paralelos, además observándose un complejo de dolinas y poljes de diversas dimensiones, disectados por un drenaje principalmente dendrítico, y ocasionalmente rectangular (Córdoba et al., 1991).

Se encuentra compuesta principalmente de rocas carbonatadas y rocas ígneas intrusivas de composición granodiorítica en menor cantidad. La elevación promedio en la región de la sierra es de 1, 500 a 1, 700 msnm. Específicamente se ubica en la subprovincia conocida como Sierras Altas, que presentan pendientes muy abruptas en donde se tienen alturas de más de 2, 700 msnm y separadas por valles estrechos (Raisz, 1964).

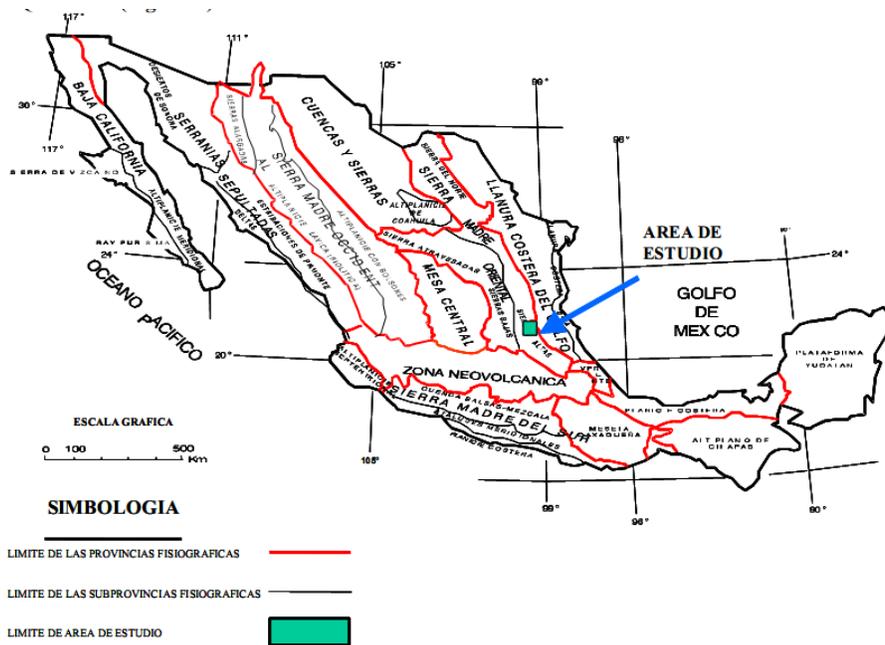


Figura 4.3.- Ubicación del área de estudio dentro del mapa de provincias fisiográficas (Modificado de Raisz, 1964).

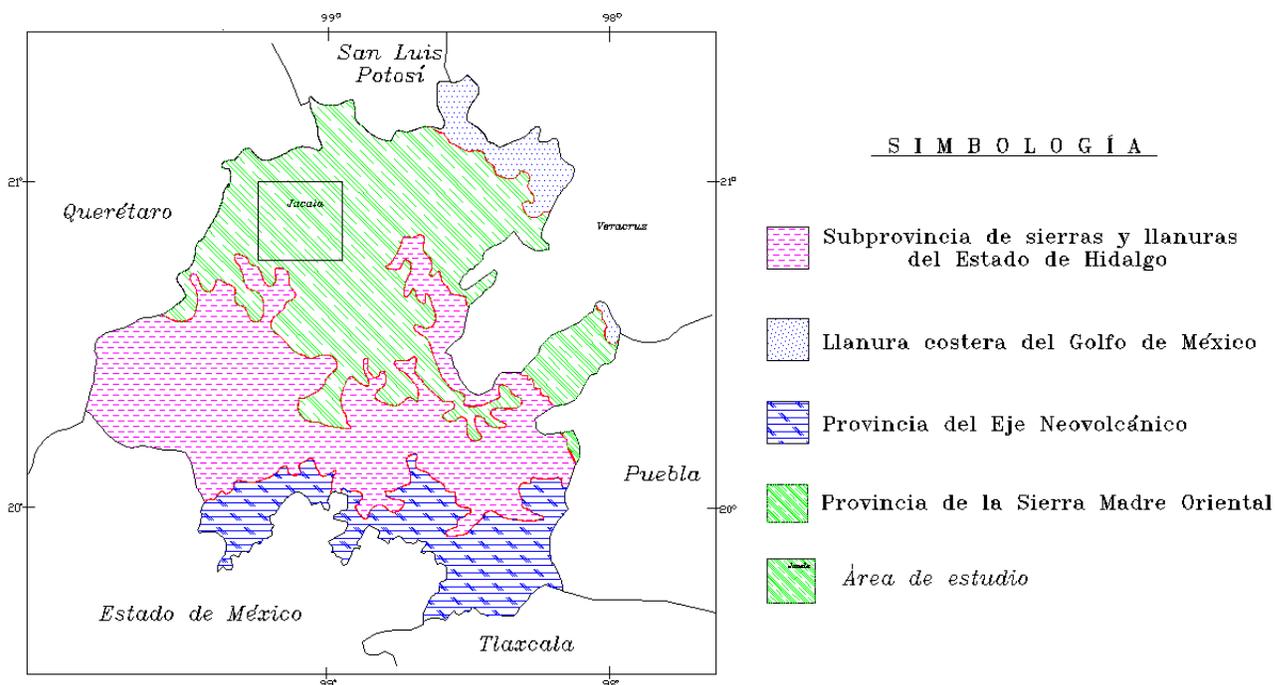


Figura 4.4.- Mapa fisiográfico del Estado de Hidalgo (Modificado de Inegi, 2009)

#### 4.4. Geomorfología

Geomorfológicamente esta provincia corresponde al tipo de montañas plegadas, en una etapa del ciclo erosivo de juventud tardía, con una topografía abrupta y arroyos profundos. Las geformas están controladas principalmente por rocas calcáreas y calcáreo – arcillosas. Las primeras dan origen a relieves fuertes con drenaje paralelo y las arcillas a relieves suaves.

El relieve que presenta el área es montañoso y accidentado formado por sierras orientadas NW – SE constituidas por rocas calcáreo – arcillosas (Córdoba, 1992). El drenaje que presenta es de tipo dendrítico y subdendrítico. Destacan los acantilados verticales por fallas (Figura 4.5).



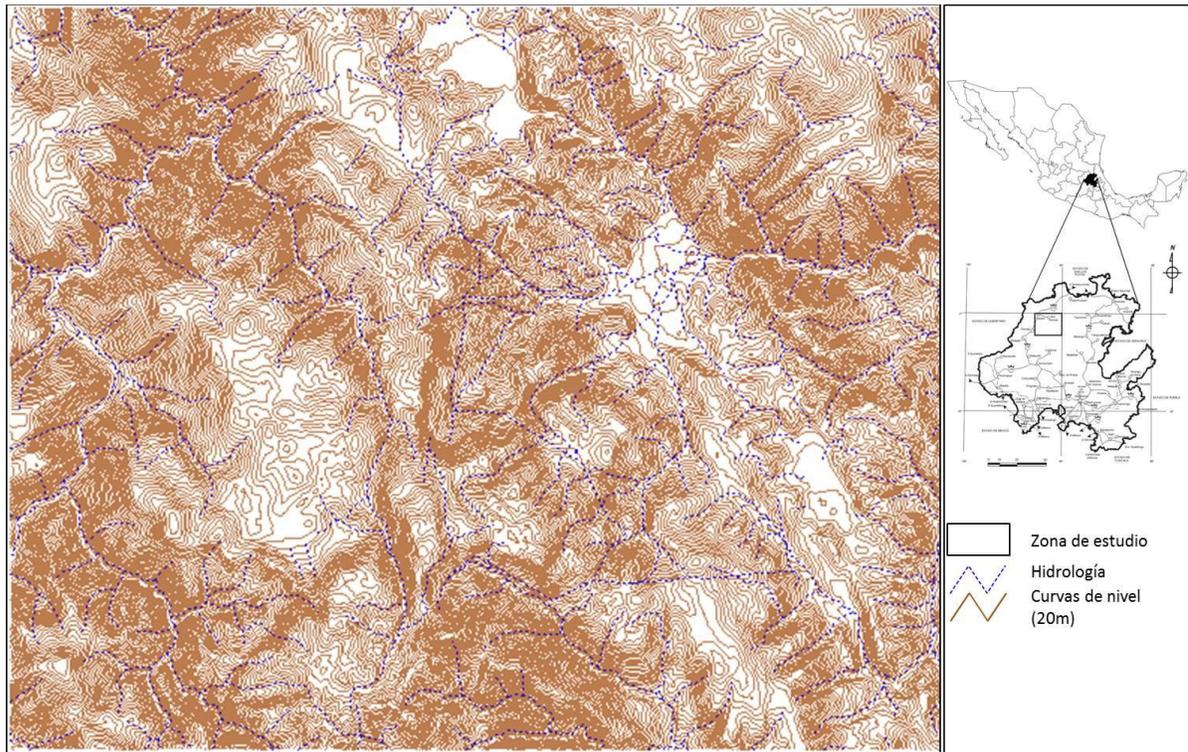
**Figura 4.5.-** Panorámica del área de estudio. En primera instancia las formas suaves, ligeramente redondeadas de la granodiorita y en el fondo las calizas masivas de la Formación El Abra que muestran un drenaje dendrítico.

#### **4.5. Hidrografía**

En el estado de Hidalgo las corrientes son escasas, esto se debe al clima y a la topografía. En las porciones norte y noreste, aunque los vientos húmedos del Golfo propician abundantes lluvias, lo abrupto de la Sierra Madre Oriental impide el aprovechamiento de los escurrimientos, ya que descienden rápidamente a las zonas bajas, las cuales forman parte de los estados de San Luis Potosí, Veracruz y Puebla (Figura 4.6). En cuanto a la explotación del agua subterránea ésta es baja, pues son pocas las áreas planas.

Esta sierra y la de Pachuca actúan como barrera orográfica, debido a que los vientos descargan su humedad en las laderas norte y este de las mismas; por ello, en el resto de la entidad las lluvias son escasas, sin embargo, el relieve es más suave y permite la utilización de los pocos ríos importantes.

La región de Jacala corresponde a la región hidrológica del Rio Panuco y a la cuenca del Rio Moctezuma, las cuales pertenecen a la vertiente del Golfo de México. El municipio de Jacala se extiende entre los ríos Moctezuma y Amajac, localmente denominado Rio Quetzalapa; los cuales atraviesan distintas comunidades pertenecientes a dicho municipio.



**Figura 4.6.-** Mapa de aguas superficiales y relieve del municipio de Jacala de Ledezma, Hidalgo (modificado de Inegi, 2005).

#### 4.6. Clima en el municipio de Jacala de Ledezma

El clima que presenta la región es semi – cálido ((A)C(wo)w), el más cálido de los templados, con temperaturas medias anuales mayores a los 18 °C y la del mes más frío menor a los 18 °C, siendo el más seco de los templados sub –húmedos con lluvias en verano (Figura 4.7), con un coeficiente de P/T menor a 43.2. Teniendo su porcentaje de lluvia invernal menor a 5 de la anual (García, 1964).

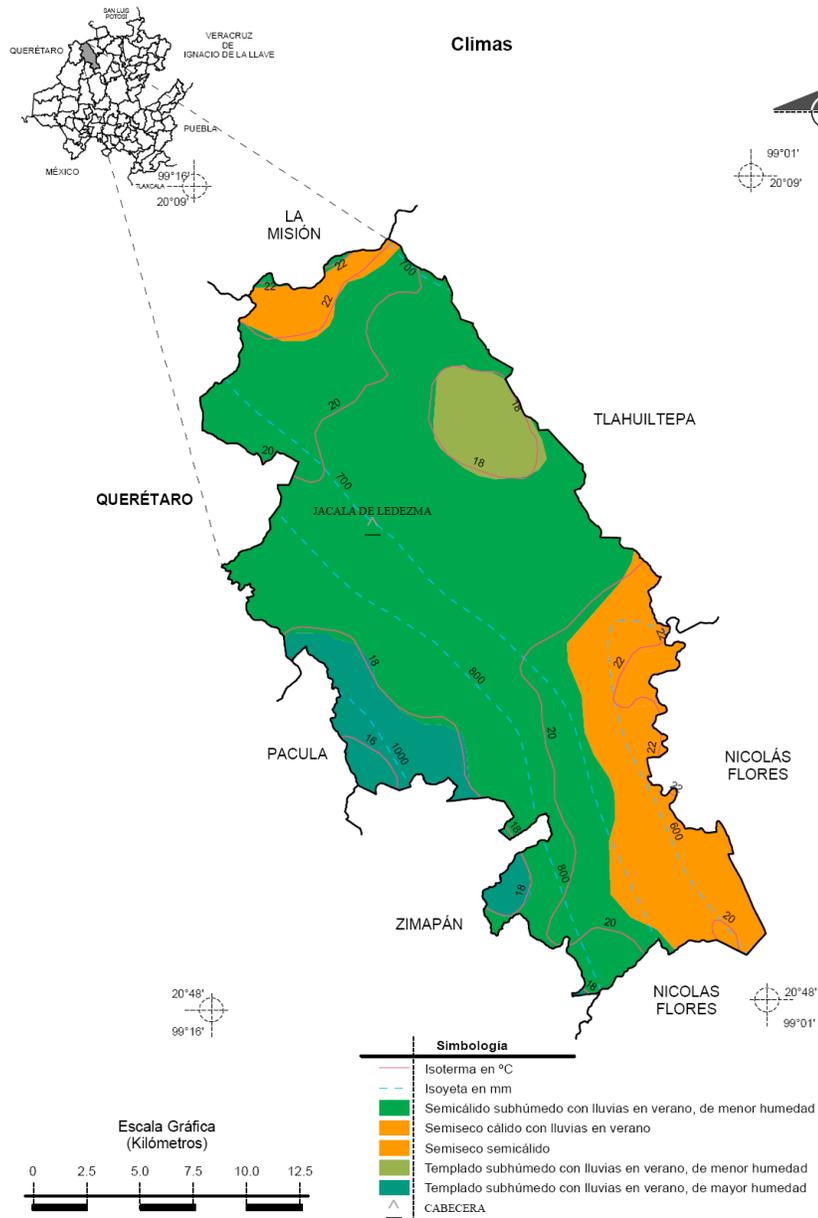


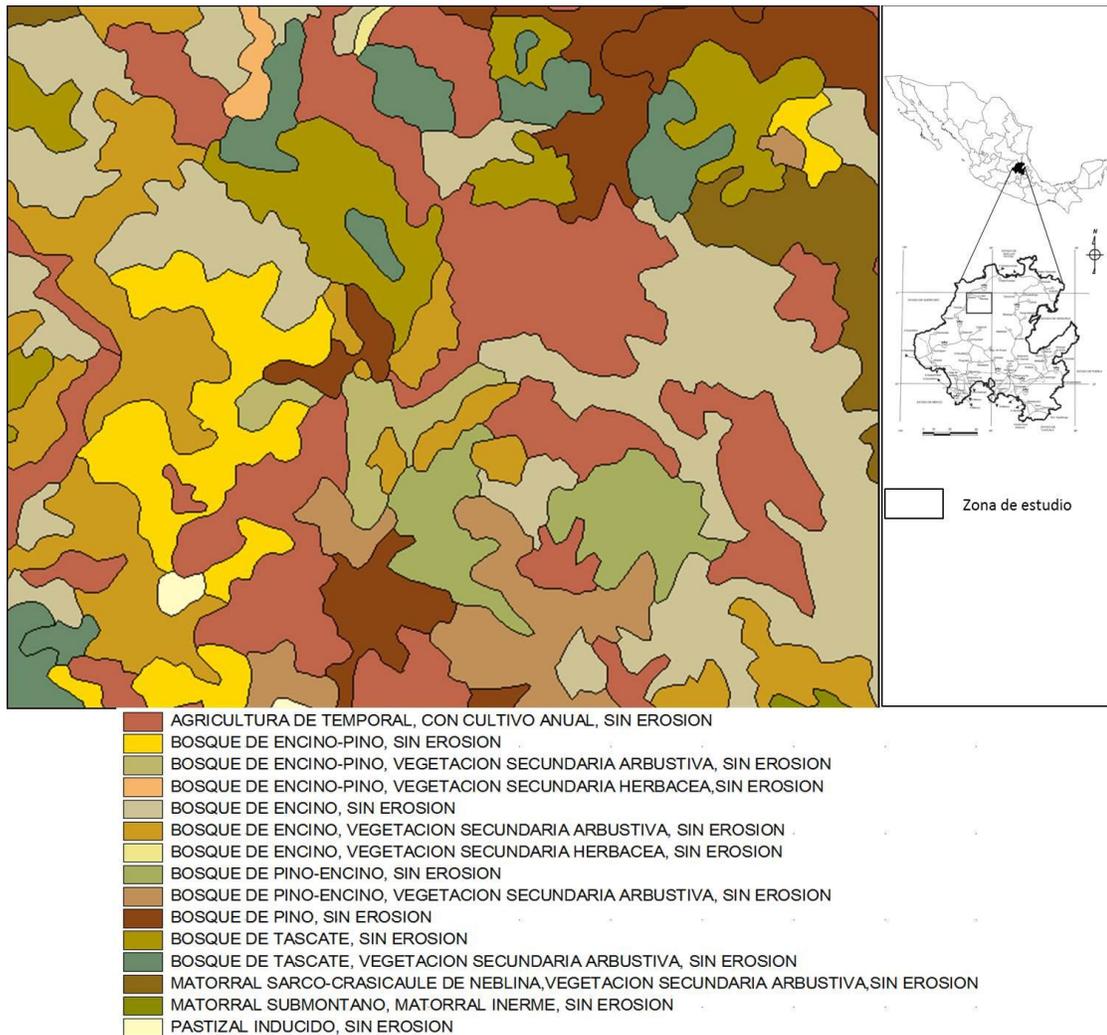
Figura 4.7.-Mapa de climas (modificado de Inegi, 2005).

#### 4.7. Vegetación y Suelos

La vegetación predominante en la región de Jacala está constituida por bosque de encino en las partes altas, mientras que en las zonas bajas abundan matorrales arbustivos, que en general se encuentran soportados por Feozem, Rendzinas, Luvisoles y Regosoles, bien drenados, con presencia de calizas y lutitas (Figura 4.8). La distribución altitudinal del bosque varía de 500 a 1200 metros y es común de climas semisecos, o templados

subhúmedos y semicalidos donde las temperaturas medias anuales tienen rangos de 20 a 24 °C y las precipitaciones entre 600 y 1200 milímetros en el mismo lapso (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2001). Las especies que se encuentran son caducifolias, que pierden su fojalle durante un corto periodo del año entre ellas se encuentran: **Quercus affinis**, **Q. castanea**, **Q. eduardii**, **Q. laeta**, **Q mexicana**, **Q. obtusada** y **Q. sartorii**.

Ademas en algunas areas se encuentra matorral submontano (especies con escasas espinas) de 3 a 5 metros de alto. Las especies predominantes son: **Neopringlea integrifolia** y **Montanoa**, otras plantas leñosas importantes son de los generos **Pistacia**, **Rhus**, **Dodonaea**, **Fouquieria**, **Helietta**, **Sophora**, **Karwinskia**, **Portlandia**, **Croton**, **Salvia**, **Bursera**, **Acacia**, ver figura 4.9.



**Figura 4.8.-** Uso de suelo en el área de estudio.



**Figura 4.9.-** Vegetación en el área de estudio.

# 5. CONTEXTO GEOLÓGICO

## 5. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 5.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se localiza dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre Oriental, abarcando un cinturón de pliegues y cabalgaduras desarrolladas durante el Cretácico tardío – Terciario temprano. Las rocas más antiguas son jurásicas y se restringen a la parte este de la Sierra Madre Oriental y hacia el oriente de la Plataforma Valles-San Luís Potosí (PVSLP).

Tectónicamente el área se vio afectada por procesos de distensión durante el Triásico e inicios del Jurásico, relacionados con la apertura del Golfo de México, originando una serie de fosas, que al ser transgredidas por los mares jurásicos, desarrollaron una cuenca que evoluciono a una plataforma carbonatada en el Albiano-Cenomaniano (PVSLP), que facilitó posteriormente el depósito de rocas calcáreas, representadas en el área por la Formación El Abra, hasta que los depósitos se hicieron más pelíticos originando la Formación Soyatal, mientras que al oriente los depósitos de cuenca continuaban su desarrollo (Suter, 1990).

Todos estos rasgos litológicos se deformaron posteriormente durante los eventos laramídicos, resultando de estos una serie de plegamientos y cabalgamientos, dando origen a la Sierra Madre Oriental. Estructuralmente los pliegues que se presentan en la región tienen una tendencia NW-SE, muchos de ellos recostados hacia el E-NE, mientras que las fallas de orientación NW-SE actúan como contactos litológicos (Restovic – Pérez, I. V., 1973).

Los rasgos estructurales típicos que se observan incluyen pliegues, fallas de despegue, rampas de cabalgadura, combamientos de fallas, y pliegues asociados a sedimentos jurásicos y cretácicos. Las rocas cretácicas se deformaron como una sola unidad ya que forman un paquete de rocas competentes de espesor considerable (Suter, 1990).

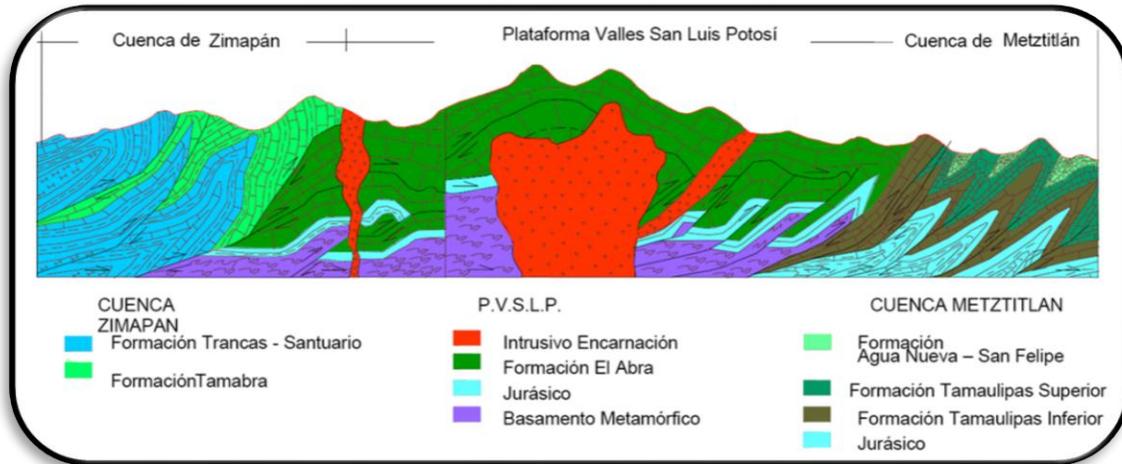
Dos sistemas montañosos, derivados de la Sierra Madre Oriental recorren el estado de Hidalgo: el primero atraviesa la parte oriental desde Tulancingo hasta Huejutla y el segundo atraviesa la parte occidental desde Pachuca hasta Jacala. Estos dos sistemas montañosos se consideran como las últimas estribaciones hacia el poniente de la Sierra Madre Oriental y están separados por el Río Amajac.

Dentro del área se han diferenciado algunos elementos morfoestructurales que corresponden a paleoelementos, como son la Plataforma Valles San Luis Potosí (PVSLP), la Cuenca de Zimapán y la Cuenca de Metztitlán.

La cuenca de Zimapán es una cuenca intracratónica, la cual se desarrolló entre la PVSLP y el complejo arrecifal de la Formación El Abra, en la base de esta última se depositó una secuencia de rocas jurásicas de origen vulcano – sedimentario asociadas a la presencia de un arco volcánico perteneciente al Terreno Guerrero. Estas secuencias paulatinamente cambian a sedimentos cretácicos calcáreo-arcillosos, y posteriormente en el Albiano – Cenomaniano se depositaron rocas carbonatadas de mar abierto con presencia de derrubios de material arrecifal de los complejos arrecifales que lo bordeaban, lo que corresponde a la Formación Tamabra.

La cuenca de Metztitlán se identifica como la secuencia aflorante del Anticlinorio de Huayacocotla, se encuentra constituida por una potente carpeta de sedimentos cretácicos de mar abierto que se depositaron sobre una secuencia transgresiva del Jurasico, es decir ambientes mixtos en la base y de cuenca en la cima.

Finalmente estas secuencias han sido afectadas por distintas etapas orogénicas, y por cuerpos de rocas volcánicas y plutónicas de edad terciaria, que han alterado su morfología original (Figura 5.1). En la figura 5.2 se puede observar la morfología actual del área.



**Figura 5.1.-** Sección transversal que muestra la geología regional del Estado de Hidalgo, así como su estilo estructural (Suter, 1990).

Las rocas ígneas se encuentran representadas por masas intrusivas “*Stocks*” de composición acida a intermedia, expuestas ampliamente en la zona, las cuales se encuentran intrusionando a las rocas sedimentarias antes mencionadas, dando origen a rocas metamórficas de contacto y depósitos de tipo pirometasomático (caso de este estudio).



**Figura 5.2.-** Morfología actual, Jacala de Ledesma.

## 5.2. GEOLOGÍA LOCAL

Geológicamente el área de estudio se encuentra constituida por una potente formación de calizas marinas conocidas como Formación El Abra, esta unidad estratigráfica es altamente fosilífera y se le ha asignado una edad Albiano – Cenomaniano (Suter, 1990; SGM, 2002).

Al norte del pueblo de Jacala la Formación El Abra es de estratificación gruesa, plegada y muestra un rumbo N50°W y buzamiento de 54°SW (ver Figura 5.3). La caliza es de color gris – crema, cristalina, en fractura fresca y con nódulos de pedernal negro en algunos horizontes. Como a un kilómetro al norte de Jacala y en la barranca de San Antonio se aloja un dique de pórfido granodiorítico que corta a la Formación El Abra en forma de herradura abierta.

Este cuerpo ígneo tiene un ancho aproximado de 200 a 300 metros y cruza la carretera México-Laredo entre los kilómetros 269 y 270, megascópicamente el intrusivo ígneo presenta textura porfirítica, constituida por fenocristales de feldespatos potásicos alterados de color blanco contenidos en una matriz fina de plagioclasas, teniendo como máfico dominante la biotita. El color de la roca depende del grado de alteración y varía de blanco a gris claro verdoso.



**Figura 5.3.-** Calizas de la Formación El Abra.

Los efectos del metamorfismo de contacto ocasionado por el intrusivo en las calizas, se manifiesta en forma de marmorización y granatización.

A ambos lados del intrusivo, las calizas están sumamente fracturadas, localizándose algunas fallas importantes en dirección normal al rumbo de dique. En algunas zonas presenta una estructura brechoide debido a numerosas fracturas que han sido rellenadas con calcita de redepositación.

Los depósitos minerales ocurren en la zona de *skarn* encontrados en varias localidades en contacto de la caliza y el intrusivo. Sin embargo, los minerales de mena de estos depósitos principalmente consisten de hierro (magnetita y hematita) acompañados por cobre (calcopirita y malaquita secundaria), en general se encuentran depósitos principalmente compuestos por magnetita acompañados por minerales de cobre, y por el contrario, como se puede ver en la mina Nuevo Encino Prieto que se encuentra mineralizada principalmente por sulfuros y en menor cantidad por magnetita y hematita diseminadas.

Las rocas plutónicas del área de estudio, de acuerdo a las descripciones megascópicas realizadas en los afloramientos, pueden variar de granodiorita a cuarzomonzonita, son de grano medio e incluyen enclaves de reducido tamaño (centimétrico) poco frecuentes y de composición con tendencia diorítica. Dichas rocas están compuestas por plagioclasa, hornblenda y/o clinopiroxeno, feldespato potásico, cuarzo, biotita, augita y minerales opacos.

Geoméricamente los granitoides en esta zona presentan una morfología alargada y están orientados suroeste – noreste, perpendicularmente a la directriz que siguen las estructuras laramídicas.

Cabe mencionar que los afloramientos graníticos no son continuos, lo cual dificultó el muestreo y la completa delimitación de los contactos intrusivos *in situ*; por tal motivo la delimitación se hizo mediante las ortofotos, utilizando diversos programas de SIG (Sistemas de Información Geográfica), como Arc View 3.1, Arc Gis 9.3.

La alteración de los granitoides de la zona, es variable, ya que podemos encontrar afloramientos donde la roca es muy fresca y sitios donde solo encontramos arenas (*Saulo*) y vestigios de los granitoides, como es el caso del arroyo de Guayabos.

Los diques de pórfido cortan las secuencias sedimentarias del Mesozoico y también se ha observado que se cortan así mismos, evidencia de varios eventos de intrusión hipabisal. Todos están cloritizados en mayor o menor medida y presenta un espesor variable (decimétrico a métrico).

Dichos cuerpos graníticos forman *stock's* y apófisis en forma de diques de morfología irregular, observados en las inmediaciones del poblado de San Nicolás (ver figura 5.4), las minas El Refugio, Nuevo Encino Prieto, y el arroyo de Guayabos, y Flores-Castro, 2001 reporta cuerpos similares en los afloramientos de La Esmeralda, El Cobre, La Trinidad y la mina Santo Domingo.



**Figura 5.4.-** Contacto del pórfido con las calizas de la Formación El Abra.

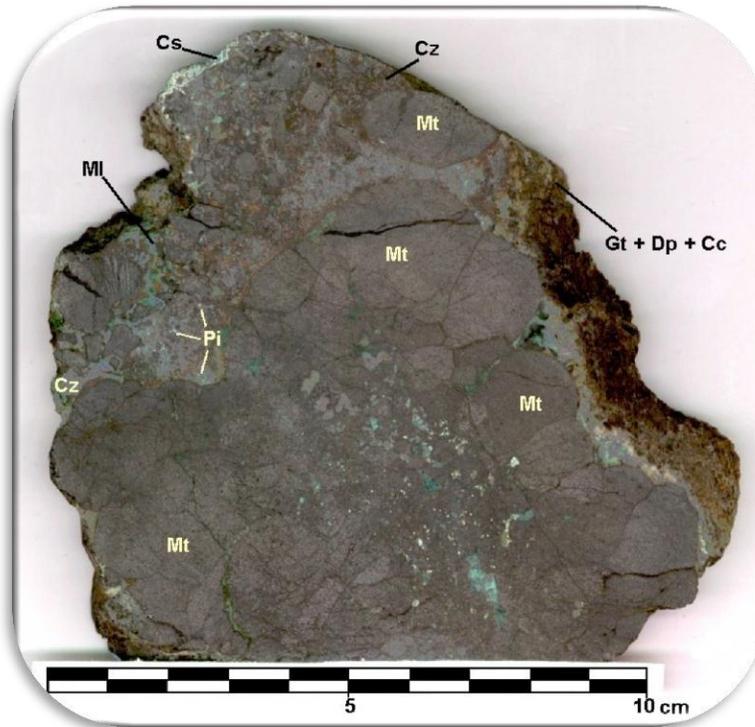
En la mina El Refugio la mineralización a la vista es básicamente de óxidos, entre los que destacan hematita, magnetita y goetita, y en menor proporción sulfuros como pirita y principalmente calcopirita, en esta última es en la que podemos encontrar partículas de teluros de oro con bismuto o solo teluros de oro, que varían en cuanto a su tamaño de 1 a 12 micras. Los granitoides encontrados en esta mina son de grano medio (milimétrico) en el que se pueden apreciar a simple vista plagioclasa, biotitas, anfíboles y minerales opacos. Ver Figura 5.5.



**Figura 5.5.-** Mineralización en la Mina El Refugio (Principalmente óxidos de Fe (hematita y magnetita), con hasta 4.12 g/ton de oro).

En la mina Nuevo Encino Prieto y en sus alrededores, el cuerpo granítico aflora ampliamente, presenta un color gris oscuro (de aspecto diorítico-grabroico), es de grano medio (milimétrico) en el que se pueden apreciar feldespatos, biotita, anfíbol y minerales opacos de grano fino. Se observa con claridad el contacto que éste forma con rocas carbonatadas del cretácico con formación de mineralogía calcosilicatada de *skarn* con granate, diópsido, calcita y cuarzo y mineralización de mena con sulfuros tipo pirita, calcopirita, esfalerita, galena y bornita, además de óxidos como magnetita y hematita.

En la mina La Trinidad el conjunto mineral que forma la roca plutónica tiene una textura holocristalina, inequigranular-porfídica, destacando esencialmente la presencia del clinopiroxeno (diópsido) con hornblenda y biotita. Además de plagioclasa, feldespato potásico, minerales opacos, titanita, biotita, cuarzo y apatito (Flores – Castro, 2001). Ver Figura 5.6.



**Figura 5.6.-** Muestra de mano de la mina La Trinidad (Fe – Cu). Se observan crecimientos botroidales de magnetita (Mt) y brecha mineralizada con malaquita (MI), crisocola (Cs) y pirita (Pi), cementados por cuarzo (Cz) y calcita (Cc). Escala gráfica 10 cm.

En la mina Santo Domingo los granitoides se asocian a un *skarn* de wollastonita, granate y epidota con mineralización de pirita y calcopirita diseminadas con hematita y limonita y malaquita accesorias (Flores – Castro, 2001).

Por otra parte podemos atribuir la aparición del Telurio en los granitoides a la intemperización, infiltración y adición de las sulfosales de los yesos de la Barranca de San Nicolas a los fluidos mineralizados que acompañaban la intrusión.

# 6. ESTRATIGRAFÍA

## **6. ESTRATIGRAFÍA.**

La estratigrafía del Estado de Hidalgo tiene una relación inmediata con el origen del Golfo de México (Jurásico), con el rompimiento de Pangéa (Triásico tardío), cuando la placa de Norteamérica comienza a separarse de la Sudamericana y Africana. La separación de estas placas origino la formación de grabens y horsts que controlaron los patrones de sedimentación en el área de estudio (Padilla y Sánchez, 1982).

### **6.1. Jurásico Superior**

#### **Formación Las Trancas**

Su nombre fue propuesto por Segerström, 1956 en la localidad de el Puerto de Las Trancas, Hidalgo. Las define como lutita calcárea filítica, limolita, caliza micrítica piritífera con pedernal, así como grauvaca, arenisca y ocasionales horizontes delgados de tobas volcánicas de composición andesítica, intercalados con las fracciones de lutita calcárea.

Esta unidad es la más antigua de las que afloran en el área, su distribución abarca la porción central del área y se encuentra constituida por una secuencia calcárea en estratos delgados a medianos de color gris, se encuentra intercalada con lutitas de color gris oscuro, intemperizando a tonos rosáceos. Estas rocas observan diferentes grados de metamorfismo, encontrándose comúnmente calizas recristalizadas y filitas. Es en esta unidad donde se presenta mineralización de sulfuros metálicos asociados a la intrusión de cuerpos hipabisales intermedios.

Miembro inferior, se caracteriza por la presencia de horizontes vulcanoclásticos que se intercalan con estratos calcáreo-arcillosos que presentan radiolarios calcificados.

Miembro medio, presenta alternancias de lutitas, margas, limolitas que alternan estratos con material vulcanoclástico tobáceo con pirita diseminada. Contiene abundantes radiolarios calcificados, restos de moluscos y espículas de esponjas.

Miembro superior, formado mayoritariamente por caliza de textura mudstone-wackestone intercalada con lutita que están intensamente fracturadas, con boudinage,

llegando a desarrollar estrangulamientos intraestratales que se observan principalmente en el Puerto Las Trancas.

La edad atribuida por Bernabé, 1994 por la presencia de radiolarios calcificados con fragmentos de ostrácodos y foraminíferos planctónicos ubican a la Formación Las Trancas dentro del Kimmeridgiano-Barremiano.

## **6.2. Cretácico Inferior**

### **Formación Tamaulipas**

A las rocas del Jurásico le sobreyacen en aparente contacto concordante la Formación Tamaulipas, esta formación no ha sido diferenciada; sin embargo, Carrillo-Martínez y Suter, 1982 incluyen en esta formación las facies del Albiano - Cenomaniano y la correlacionan con la Tamaulipas Superior del occidente de la PVSLP. Está constituida por caliza y margas gris a gris oscura, de estratificación media a delgada que alterna con pedernal negro. A menudo se encuentran intercalaciones de lutita filítica oscura y lutita calcárea en capas delgadas. Se ha observado su contacto transicional con la caliza masiva del Abra.

El estudio bioestratigráfico de la formación arrojó una edad del Albiano medio al Turoniano, encontrando fauna de amonitas y microfósiles (Muir, 1936).

### **Formación Tamabra**

La Formación Tamabra fue descrita por Heim, 1940 quien consideró que esta formación representa un cambio lateral de la Tamaulipas Superior, indiferenciada. El autor designó un conjunto de facies de transición que aflora a lo largo del borde oriental de la PVSLP. Suter, 1990 reporta afloramientos de la Formación Tamabra al norte de Hidalgo y las describe como brechas sedimentarias y bloques derivados tanto del borde como del interior de la plataforma. También menciona que el talud externo consiste de caliza bioclástica con estratificación graduada.

### 6.3. Cretácico Superior

#### Formación El Abra

Sobreyaciendo transicionalmente a las formaciones del Cretácico Inferior aflora la Formación El Abra (Formación El Doctor) compuesta por un depósito de calizas que comprende distintas facies de plataforma. En la PVSLP se denomina Formación El Abra a los afloramientos de caliza de facies de banco calcáreo consistentes de caliza biógena, dolomita y evaporitas con espesores de 1500 a 2000 m. La edad asignada por Coogan, 1973 es referida al Albiano-Cenomaniano.

Muir, 1936 distingue dos miembros en la Formación El Abra: uno inferior constituido por caliza de rudistas, denominado miembro Taninul. El miembro superior caracterizado por la presencia de caliza con abundantes miliólidos que distinguen a la Formación El Abra. La principal diferencia estriba al presentarse cambios laterales de facies en la misma plataforma.

En la Formación El Abra se presentan las siguientes litofacies: una facies arrecifal con biohermas de radiolitos y caprínidos, y bioestromas de *Toucasia* y *Monopleura* asociados con foraminíferos bentónicos, una facies bioclástica, una de miliólidos y pellas, además de una facies de brecha (Suter, 1982). Así mismo, existe una dolomitización importante por reemplazamiento. La facies de talud comprende calizas de cuenca interestratificadas con brechas.

Esta formación supreyace a rocas del Aptiano y sobreyace a sedimentos del Turoniano. Gradúa lateralmente a facies de origen de cuenca como Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura. Al noroeste de Zimapán, se aprecia la relación plataforma – cuenca (Segeström, 1961).

Aflora en gran parte del área, consiste de estratos calcareos de medianos a gruesos con abundantes nódulos y bandas de pedernal. Las calizas son de color gris oscuro intemperizado en tonos claros, ofrece gran resistencia a la erosión formando grandes acantilados. Subyace en forma concordante y transicional a la Formación Soyatal y en la misma concordancia sobreyace a la Formación Las Trancas.

## **Formación Soyatal**

El término de Formación Soyatal fue propuesto por Wilson et al., 1955; y Fries, 1960 propuso la Formación Mezcala. Segerström, 1961 menciona que existe un cambio vertical de las capas de la formación Soyatal a Mezcala es gradual ya que la primera es más calcárea y la segunda clástica.

Segerström, 1961 la describió como caliza de grano fino, color gris oscuro, en capas delgadas, con intercalaciones de lutita, marga y limolita, sin pedernal. Esta formación es calcárea en su base y se vuelve arenosa en su parte superior. Los estratos se caracterizan por numerosos pliegues sinsedimentarios y *boundinage*. Se encuentra sobreyaciendo a la Formación El Abra con aparente discordancia. La edad de la Formación Soyatal es del Turoniano Superior y para la Mezcala de Santoniano - Campaniano.

Esta unidad se encuentra ampliamente distribuida hacia el NW y SW del área, constituida por una alternancia rítmica de areniscas, lutitas y margas de color gris claro, intemperizando a tonos amarillentos.

Hacia la base de la secuencia las lútitas varían de delgadas a laminares, aumentando hacia la cima su contenido de terrígenos predominando areniscas de grano fino en estratos de 20 a 30 centímetros de color gris intemperizando a colores pardo – amarillento. La unidad se encuentra afectada en la porción NW por una serie de diques de composición ácida a intermedia. Su contacto superior es discordante con la secuencia volcánica terciaria.

## **6.4. Terciario**

### **Granitoides El Calvario**

Este es un plutón fanerítico de textura porfídica inequiangular hipidiomórfica que a profundidad cambia a fanerítica equigranular. El plutón atraviesa y metamorfiza una espesa secuencia de calizas al este de Jacala sobre la barranca El Calvario. Se trata de un intrusivo que aflora escasamente entre las calizas y el caliche, debido a que ha sufrido una alteración hidrotermal muy intensa e intemperismo muy avanzado.

Estas rocas son de composición cuarzomonzodiorítica de grano medio cuyos principales componentes minerales son: augita, hornblenda común, biotita, plagioclasa, feldespatos alcalinos (ortoclasa y peritita) y cuarzo, y minerales accesorios como el apatito, titanita (esfena), rutilo y magnetita. Se observaron cambios de litofacies en las distintas localidades.

Este cuerpo es el responsable de la mineralización aurífera en la zona de estudio, así como de la marmorización y silicificación de la caliza de la Formación El Abra. En el cuerpo intrusivo se desarrolla oxidación, piritización, cloritización y epidotización muy locales.

Geométricamente los granitoides en esta zona presentan una morfología alargada y están orientados suroeste – noreste, perpendiculares a la directriz que siguen las estructuras laramidicas al noroeste – sureste.

### **Formación Las Espinas**

Simons y Mapes, 1956 nombraron Formación Las Espinas como una unidad volcánica compuesta en su mayor parte por derrames y aglomerados de composición andesítica y dacítica que cubren una extensión relativamente amplia del sur del Distrito Minero de Zimapán. Su base está interdigitada con los depósitos de la Formación El Morro, visible en el camino de Zimapán al Puerto "El Lefé" que por consecuencia se les considera contemporáneas.

Se han agrupado en esta unidad una serie de derrames lávicos de composición variable que va desde acida hasta básica, cubriendo en forma discordante a las formaciones precedentes.

Las rocas andesíticas son las que se encuentran más ampliamente distribuidas en el área presentándose como derrames e intercalaciones de horizontes tobaceos arenosos. Cubriendo a estas efusiones se tienen lavas amigdaloides de composición basáltica.

Derrames dacíticos y piroclásticos de la misma composición son observados hacia la porción central del área donde parecen ser las rocas volcánicas más jóvenes.

### **Formación Atotonilco**

Geyne *et al.*, 1963, describe esta unidad proponiendo como localidad tipo el poblado de Atotonilco El Grande, Estado de Hidalgo. Según este autor esta formación está compuesta principalmente por capas de textura variable desde fangolita hasta conglomerado. En esta área los basaltos se encuentran intercalados con tobas de composición dacítica a riolítica, dando así una secuencia bimodal como lo consideró Robin, 1975.

La litología consiste principalmente de una secuencia bimodal de rocas volcánicas como basaltos, intercalados con tobas de composición riolítica, dacítica y andesítica.

Los basaltos megascópicamente presentan una estructura compacta masiva, con tonalidades gris oscuro y verde, intemperizan a color rojizo, de textura afanítica de aspecto vítreo, a veces se le observa intemperismo esferoidal.

Las tobas riolíticas son de color crema que intemperizan a color rojizo y blanquecino (caolinización), con textura fanerítica de aspecto vítreo, constituida por fenocristales de plagioclasas, cuarzo, ferromagnesianos alterados y óxidos de fierro.

Las andesitas se presentan de color gris oscuro, estructura compacta, textura afanítica, los minerales observables son principalmente minerales máficos (Servicio Geológico Mexicano, 2002).

### **6.5. Cuaternario**

El Cuaternario y el Reciente están representados por aluviones y conglomerados polimícticos de pie de monte. El aluvión se encuentra cubriendo grandes extensiones de valles y áreas aledañas a ríos y arroyos. Estos aluviones se encuentran constituidos por material no consolidado, producto de la desintegración de rocas preexistentes. Este aluvión está constituido por cantos rodados, grava, arena, arcilla y carbonato de calcio (García y de los Santos, 1990).

En la Figura 6.1 se muestra la columna estratigráfica correspondiente al área de estudio.

Tiempo geológico			Edo. de Hidalgo	San Nicolas	Columna litológica	
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Sedim. aluviales basaltos	Sedim. aluviales		
		Pleistoceno	Tarango Grupo San Juan Andesita Jalpan			
	TERCIARIO	Plioceno	Mioceno	Tobas Donguinyo Atotonilco Las Espinas	Basalto Atotonilco	
				Tobas andesíticas Las Espinas		
		Oligoceno	Eoceno	Grupo Pachuca		
				Fanglomerado El Morro		
				Chicontepec	Granitoides El Calvario	
		MESOZOICO	CRETACICO	Sarmiento	Soyatal	Soyatal
	El Abra Tamaulipas				El Abra Tamaulipas	
	Las Trancas Tepexic			Las Trancas		
Jurásico						

Figura 6.1.- Columna estratigráfica del área de estudio (modificada de Flores –Castro, 2001).

# **7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

## 7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Geomorfológicamente la región se caracteriza por pequeños valles, formados por dolinas, debido a la karsticidad de las rocas calizas y a zonas topográficamente altas que dan origen a acantilados y cañadas abruptas.

Regionalmente las estructuras geológicas presentes en la zona son consecuencia de los grandes plegamientos ocurridos durante la Orogénia Laramide y posteriormente a ella, en las etapas de distensión dando origen a los grandes fallamientos normales.

De tal manera que localmente se tiene la presencia de una gran estructura anticlinal; recostada hacia el NE, abierta en rocas del Jurásico Superior y cuyo eje axial se orienta NW-SW. El cual se encuentra afectado por una falla normal de rumbo NE – SW hacia su flanco NE ocasionando un aumento en los espesores de los sedimentos del Cretácico Inferior. En su flanco poniente se localizan las obras mineras mencionadas, ya que es aquí donde se tiene el emplazamiento de un cuerpo cuarzomonzodiorítico al que se ha asociado la mineralización de esta porción.

Existen dos sistemas de fracturamiento; uno NW – SE que es el más antiguo y otro NE – SW asociado a eventos más recientes. Debido a que el primer sistema presenta mineralización de sulfuros, afectando a sedimentos del Jurásico Inferior se considera de formación contemporánea a la mineralización. Mientras que el sistema más joven no presenta algún tipo de mineralización, por lo que se considera de formación post – mineral.

Las fallas regionales son las que controlan la red del drenaje regional, mientras que las locales se encuentran paralelas o perpendiculares a las fallas regionales y son las más viables para delimitar los contactos con el intrusivo y delimitar los cuerpos marmorizados.

Existe, al parecer, un control estructural de la mineralización, evidenciado por la asociación de los cuerpos mineralizados con diques, fallas y el plegamiento de los estratos de la caliza masiva.

Se aprecia claramente dos dominios con características morfológicas muy diferentes: el oriental presenta un drenaje de mayor densidad y evolución desarrollando profundas barrancas con sección en “V”, asociadas en ocasiones a lineamientos NE-SW, con gran cantidad de talves o tributarios desarrollando drenajes subparalelos, también se aprecian lineamientos NW-SE siguiendo orientaciones laramídicas, pero no son pliegues, por lo que se suponen posibles escalones tectónicos asociados a cabalgaduras.

Dentro de este mismo dominio, en su vértice noroccidental, se aprecia otro cambio en el que el dren es dendrítico, de alta densidad, y las barrancas ya no son tan profundas.

En la corroboración en campo de lo antes descrito se comprobó que efectivamente este dominio corresponde con todas las secuencias calcáreo arcillosas mesozoicas de la cuenca Sierra Madre Oriental, y los lineamientos apreciados corresponden con parte de las más grandes cabalgaduras cartografiadas en el área (Lobo- Ciénega y La Misión), mientras que el cambio en el vértice nororiental corresponde con la Formación Santiago, que al ser solo arcillosa desarrolla una expresión muy diferente.

En el dominio occidental se aprecia un dren errático, a veces casi nulo, y en otra en grandes cañones verticales como el del río Moctezuma y barranca Seca, por otra parte destaca su homogeneidad en su textura. Solo presenta cambios locales asociados a partes bajas, donde se aprecian planicies de depósitos clásticos más recientes.

Estructuralmente este dominio se aprecia plegado desarrollando claras estructuras con ejes orientados NW – SE, como sinclinales y anticlinales no muy cerrados, estos son rotos por fallas de orientación NE – SW, más frecuentes en este dominio y usualmente aprovechadas por los drenes principales como el río Moctezuma y barranca Seca, sin embargo no desarrollan saltos o relices evidentes para interpretar su movimiento.

Lo antes interpretado corrobora bien con la información levantada en campo ya que todo este dominio corresponde con la Formación El Abra, lo cual explica la homogeneidad de la unidad y su drenaje errático debido al desarrollo de karst en la unidad, también los depósitos planos en las partes bajas corresponden principalmente con coluviones asociados a dolinas y sistemas de polges desarrollados en la plataforma cretácica.

Las estructuras plegadas corresponden con los anticlinales y sinclinales mapeados en la carta, así pasa también con las fallas y lineamientos detectados.

Así como todas las estructuras apreciadas en la imagen de satélite corresponden con estructuras corroboradas en campo, también existen varias y muy importantes estructuras, que no parecen expresarse en la imagen, como es el caso de las cabalgaduras.

# 8. METODOLOGÍA

## 8. METODOLOGÍA

### 8.1. Muestreo

El proceso del muestreo se puede definir como la secuencia de operaciones selectivas realizadas sobre un todo, realizando mezclas y particiones hasta llegar a una muestra homogénea y representativa del todo. Por otra parte, es importante tener en cuenta la superficie que se pretende representar con las muestras o la denominada “área de muestreo”, con el fin de no exceder los costos del proyecto por una sobre cobertura de la zona de estudio.

Los puntos de muestreo se determinaron con base en la cartografía y topografía existentes del área de estudio, y con ello se desarrolló un plan de muestreo lo que permitió la obtención de muestras representativas del entorno geológico estudiado. En la prospección geoquímica orientada a los yacimientos minerales, ésta operación es fundamental y crítica, dado que dará pauta para continuar trabajos de exploración y explotación que conlleva una fuerte inversión económica. Al respecto, si el muestreo no se implementó de forma correcta, los datos que resulten no serán fidedignos y se corre un importante riesgo de fracaso del proyecto e importantes pérdidas económicas, además del tiempo invertido.

### 8.2. Técnicas de muestreo

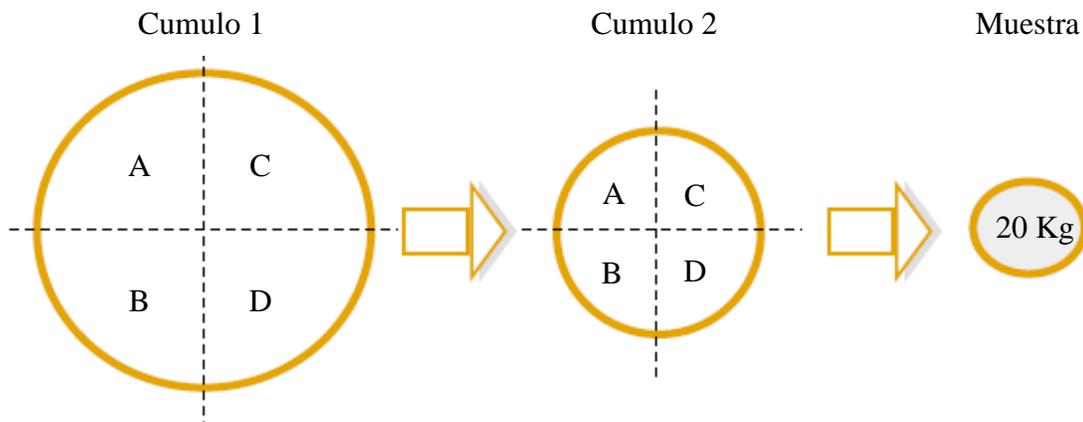
La tarea fundamental del prospector consiste en buscar, extraer, concentrar y recolectar muestras representativas del todo, por ello es fundamental la utilización de métodos o técnicas de muestreo afines a los objetivos de la prospección realizada.

Las principales técnicas o métodos utilizados fueron: el cuarteo y la batea para sedimentos de arroyo, mientras que para las vetas se utilizó el muestreo de canal. A continuación se describen algunas de estas técnicas:

**Método del cuarteo:** Este método es posiblemente el más antiguo de los métodos de muestreo probabilístico y puede ser aplicado tanto a pequeñas muestras (gramos) como a grandes muestras (toneladas) (ver Figura 8.1). A continuación se describe más ampliamente

el método:

1. Se hace un cumulo de sedimentos de aproximadamente 100 kg.
2. Homogenización del cumulo de sedimentos con la utilización de pala.
3. División de la muestra en cuatro partes, para esto se requiere extender la muestra y numerar los cuatro cuadrantes.
4. Posteriormente se separan los cuadrantes opuestos A y D, y el resto de la muestra se retira.
5. La nueva muestra se homogeniza nuevamente, se divide nuevamente en cuatro cuadrantes, solo que en esta ocasión se separan los cuadrantes opuestos B y C.
6. Se repiten estos pasos hasta tener el peso deseado de la muestra (para este estudio fue de 20 kg).



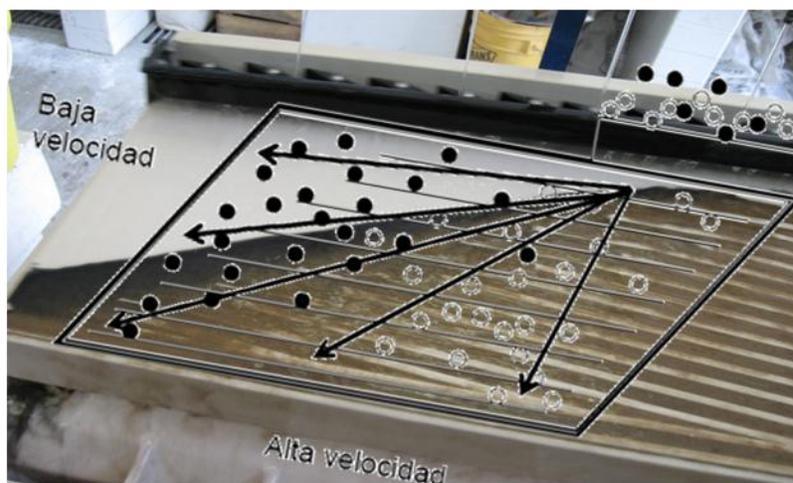
**Figura 8.1.-** Esquema ilustrativo del método del cuarteo.

### 8.3. Preparación de muestras

Para poder analizar las muestras se requiere tener ciertos cuidados y llevar a cabo la preparación de las mismas para que estas conserven la representatividad con la cual se tomaron y así tener mayor certidumbre en nuestros resultados. Los preparativos son los siguientes:

**1.- Secado de las muestras:** Las muestras obtenidas en el trabajo de campo de la prospección minera por cualquiera de las técnicas antes mencionadas, se llevaron al laboratorio en estado húmedo. Su desecación se efectuó a temperatura ambiente con el objeto de evitar oxidaciones y cambios en las propiedades físicas de los minerales en la muestra. Cuando la muestra se encuentra perfectamente seca, se retira del recipiente donde fue colocada y se pesa, quedando lista para posteriores tratamientos.

**2.- Tamizado:** Esta operación es de gran interés y debe efectuarse con cuidado, ya que de ello dependerá la calidad de las separaciones que se efectuaran con posterioridad. El tamizado se efectuó vía seca por cuestión del cuidado de los tamices. En tal operación se utilizó una tamizadora electromagnética que transmite a los tamices vibraciones en sentido vertical que a la vez da un movimiento rotativo a los productos a tamizar, acelerando el tiempo de tamizado e impidiendo el taponamiento de las mallas. En la tamizadora se puede controlar el tiempo de tamizado, según la cantidad de muestra colocada en los tamices. En el presente estudio se emplearon tamices con bastidor y trama de acero inoxidable, con aberturas de (177, 149, 105 y 88  $\mu\text{m}$ ). Por último, finalizada la tamización se recoge la fracción obtenida en cada tamiz que es de nuestro interés y se pesa, quedando lista para la separación de los minerales mediante la utilización de técnicas densimétricas como en este caso la mesa Wilfley (o más comúnmente conocida como “mesa de sacudidas”), ver Figura 8.2.



**Figura 8.2.-** Mesa concentradora Wilfley.

**3.- Pesaje:** Después de haber realizado todos los pasos anteriores se prosigue a pesar cada una de las fracciones de las muestras para poder determinar las cantidades exactas, este valor es importante ya que con él y la lectura de absorbancia que arroja la Espectrofotometría de Absorción Atómica se determinan los gramos por tonelada del elemento analizado.

**4.- Concentración:** Debido a que la mayoría de los minerales se encuentran diseminados e íntimamente ligados con la ganga, ellos tienen que ser primeramente liberados antes de ser separados. Esto se consigue con la conminución, en la cual el mineral es paulatinamente reducido hasta que las partículas de mineral limpio de interés puedan ser separadas por los métodos disponibles (mesa wilfley).

#### **5.- Digestión de muestras para la determinación de oro:**

La determinación de oro (Au) se realizó por dos técnicas de digestión: la primera por un medio alcalino (cianuro), y la segunda por un medio ácido. El uso de ambas técnicas de análisis se llevó a cabo por propuesta del Q. Martín Alamilla (comunicación personal). El proceso en medio alcalino fue el que dio mejores resultados, ya que este método ataca específicamente el elemento de interés en esta prospección (Au), mientras que el proceso de lixiviación con agua regia y su posterior determinación tiene el inconveniente de que las impurezas de hierro alteran el resultado de la valoración, generando un falso enriquecimiento. Cabe mencionar que no se realizó copelación, debido a que no se cuenta con el equipo necesario para efectuar esta técnica.

#### **5a.-Digestión en medio alcalino:**

El procedimiento en medio alcalino (cianuro) se realizó de la siguiente manera:

1. Se pesaron 5 g de muestra en balanza analítica y se colocaron dentro de un vaso de precipitados de 250ml.

2. Al vaso de precipitado conteniendo la muestra se le adiciono una solución alcalina (CaO en medio acuoso) preparada previamente, a la cual a su vez se le adicionaron 20ml de solución de cianuro<sup>1</sup> y un agente oxidante<sup>2</sup>.
3. El vaso de precipitados se colocó en una placa de calentamiento a 100°C, hasta llegar a sequedad.
4. Luego el sólido en el fondo del vaso de precipitados se dejó enfriar, se le agregaron 20ml de agua desionizada y se procedió nuevamente a efectuar el secado bajo las mismas condiciones. Esta operación se realizó dos veces de manera consecutiva.
5. Los sólidos fueron nuevamente humectados con 15ml de agua desionizada, posteriormente fueron vertidos en un embudo de vidrio, el cual contiene papel filtro Whatman 40, la solución se recibió en un matraz volumétrico de 25ml, posteriormente se aforo con agua desionizada. La solución así obtenida fue analizada por Espectrometría de Absorción Atómica.

#### **5b.- Digestión en medio ácido:**

Para la determinación en medio ácido se procedió como se describe a continuación:

1. En la balanza analítica se pesaron 5g de la muestra y se pasaron a un vaso de precipitados de 250ml al que se le adicionaron 30ml de HNO<sub>3</sub> y 30ml de H<sub>2</sub>O.
2. La mezcla se calentó en una parrilla eléctrica 120° C por espacio de dos horas aproximadamente.
3. La solución residual (5ml aprox.) se procedió a filtrar, lavando los sólidos con agua destilada y desechando el medio líquido. El sólido recuperado del papel de filtro se regresó al vaso de precipitados y se lavó el papel con agua destilada para recuperar toda la muestra.
4. La muestra fue llevada casi a sequedad para eliminar un exceso de agua, luego se sometió a digestión con agua regia<sup>3</sup>, calentando a 100° C hasta sequedad para obtener el Au.

---

<sup>1</sup> Solución preparada a partir de 1.5g de NaCN y 0.8g de CaO, aforando a 1 litro.

<sup>2</sup> 0.2 g de Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ó 5ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

5. Los sólidos conteniendo el Au se recuperan con 3ml de HNO<sub>3</sub> o HClO<sub>4</sub> y se somete a un calentamiento en parrilla hasta ebullición a 100° C por 10 minutos.
6. La muestra procedente de la digestión se coloca en un embudo el cual deberá contener papel filtro Whatman 40, la solución se recibe en un matraz volumétrico de 25ml y deberá ser aforado con agua desionizada. La solución obtenida se analiza por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

#### 8.4. Química de roca total

El estudio de la distribución y análisis del comportamiento de los elementos químicos en las rocas, en este caso ígneas plutónicas, nos ayuda a interpretar los diversos procesos geológicos que les dieron origen. Esto debido a que estos elementos en su mayoría son sensibles a cambios fisicoquímicos que quedan plasmados en cada proceso por el que pasa la roca.

Con base en el estudio de esos cambios, diversos autores como Pearce, 1984; Arth, 1976; McCarthy, 1976, 1978; Koljonen, 1974; Hanson, 1978; Floyd, 1975; Cocherie, 1978; Bateman, 1979; Harris, 1980, 1983; Thompson, 1980, 1984; Gromet, 1983, 1987; Thorpe, 1976; Gastil, 1975; Whalen, 1987; Champell, 1974, 1987; Kay, 1984; Wood, 1979; Debon, 1988; Le Fort, 1981; Cox, 1982; White, 1977, 1979 y muchos autores más han estudiado la geoquímica de rocas plutónicas y volcánicas relacionadas a contextos geológico – tectónicos conocidos. Estos establecen metodologías petrogenéticas capaces de discriminar cada uno de estos ambientes y procesos geológicos. El resultado de estos estudios son numerosos diagramas de clasificación que discriminan e identifican cada uno de los contextos geológicos que dan origen a las rocas ígneas en general, explicando su evolución y dando un aporte muy importante a la petrología.

En este campo todavía se tiene mucho por estudiar ya que no todas estas clasificaciones desarrolladas cumplen para todos los procesos y no son tan sensibles para

---

<sup>3</sup> HCl - HNO<sub>3</sub> en proporción 3:1

discriminar magmas híbridos, ultrametamorfismo, metasomatismo y tampoco reflejan claramente procesos tectónicos coincidentes.

#### **8.4.1. Tecnologías de análisis.**

Para conocer la química de los elementos mayores y traza que conforman los granitoides de “El Calvario”, se aplicó Fluorescencia de Rayos X (FRX); para la determinación de los valores de Au se utilizó Espectrometría de Absorción Atómica (EAA); mientras que para la identificación de las partículas de oro se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM – EDS).

#### **Fluorescencia de Rayos X**

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La energía absorbida por los átomos de la muestra genera la producción de rayos X secundarios o de fluorescencia emitidos por la muestra. Estos rayos X secundarios tienen una intensidad proporcional a la concentración de cada elemento de la muestra, por ello, al cuantificar esta radiación se determina la cantidad de cada elemento presente en la muestra. Ello se debe a que la radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo.

Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.

La FRX es la técnica empleada, normalmente, cuando se quiere conocer con rapidez la composición elemental exacta de una sustancia, pues permite determinar todos los elementos del sistema periódico, desde el flúor hasta el uranio, en muestras sólidas, en polvos y en líquidos. Así mismo mediante la utilización de patrones adecuados es posible realizar el análisis cuantitativo de los elementos presentes.

Análisis cuantitativo: los instrumentos modernos de fluorescencia de rayos X son capaces de proporcionar análisis cuantitativos de materiales complejos con una precisión que iguala o supera la de los métodos químicos clásicos por vía húmeda o la de otros métodos instrumentales. Sin embargo, para la precisión del análisis se requiere disponer de estándares de calibrado que se aproximen lo más posible a las muestras tanto en composición química como física o bien de métodos adecuados para considerar los efectos de la matriz.

### **Espectrometría de Absorción Atómica**

La Espectrometría de Absorción Atómica es un método instrumental que se basa en la absorción, emisión y fluorescencia de radiación electromagnética por partículas atómicas. Se emplean principalmente radiaciones del espectro ultravioleta (UV), visible y rayos X.

Para obtener un espectro de radiaciones de longitudes de ondas específicas, o rangos pequeños en lugar de bandas, es necesario que las partículas de la muestra se descompongan en partículas elementales gaseosas, proceso conocido como *ATOMIZACIÓN*. Entre las ventajas de este método se cuentan: gran especificidad, amplio campo de aplicación en la química analítica, excelente sensibilidad a pequeñas concentraciones del orden de las ppm y 1000ppm, rapidez en la determinación y gran selectividad.

Dentro de este método instrumental pueden emplearse tipos de espectroscopía como *emisión atómica* (la muestra es atomizada en la llama y actúa como fuente de radiación) y *absorción atómica* (donde la muestra se atomiza en la llama pero existe una radiación externa que produce la excitación de los electrones al estado excitado). Este último es el empleado en este estudio.

Durante el ensayo la muestra es aspirada por el quemador, donde es atomizada, siendo ésta la etapa fundamental para que la absorción sea atómica y no molecular. Luego la muestra atomizada es conducida a través de las diferentes zonas de la llama, para ser excitada por radiación proveniente de la lámpara. Luego la radiación absorbida por estos átomos ahora excitados será registrada por el tubo fotomultiplicador para ser traducida y amplificada. La lectura de la *ABSORBANCIA*, de acuerdo a la Ley de Beer, sirve para la calibración del aparato:

$$A = a.b.c$$

siendo:

A: Absorbancia medida en el aparato

a: absorptividad molar de la muestra, Lt/cm mg

b: camino óptico recorrido por la radiación a través de la muestra, cm

c: concentración de la muestra, mg/Lt

Antes de cada ensayo deberá establecerse mediante patrones el cumplimiento de la mencionada ley. Y finalmente se produce de esta forma una débil señal eléctrica, que es simplificada por un galvanómetro, el cual da la lectura.

En geoquímica este método es usado en la localización de anomalías por medio del análisis de trazas de metal en rocas, suelos y sedimentos de arroyo.

### **Microscopio electrónico de barrido (Scanning electronic microscopic “SEM”)**

El microscopio electrónico de barrido (SEM) (ver Figura 8.3), es uno de los equipos más versátiles en el estudio y análisis de materiales. El SEM ha sido usado para caracterizar morfológicamente cerámicos, polímeros, depósitos sobre metales, vidrios y películas. En este equipo se obtienen imágenes tridimensionales de los materiales a fin de relacionar su microestructura con sus propiedades físicas y químicas. Además, se utiliza para monitorear los cambios morfológicos generados en la superficie de los materiales debido a los procesos experimentales a los que fueron sometidos. Este equipo, también, realiza el análisis elemental semi – cuantitativo de los materiales.

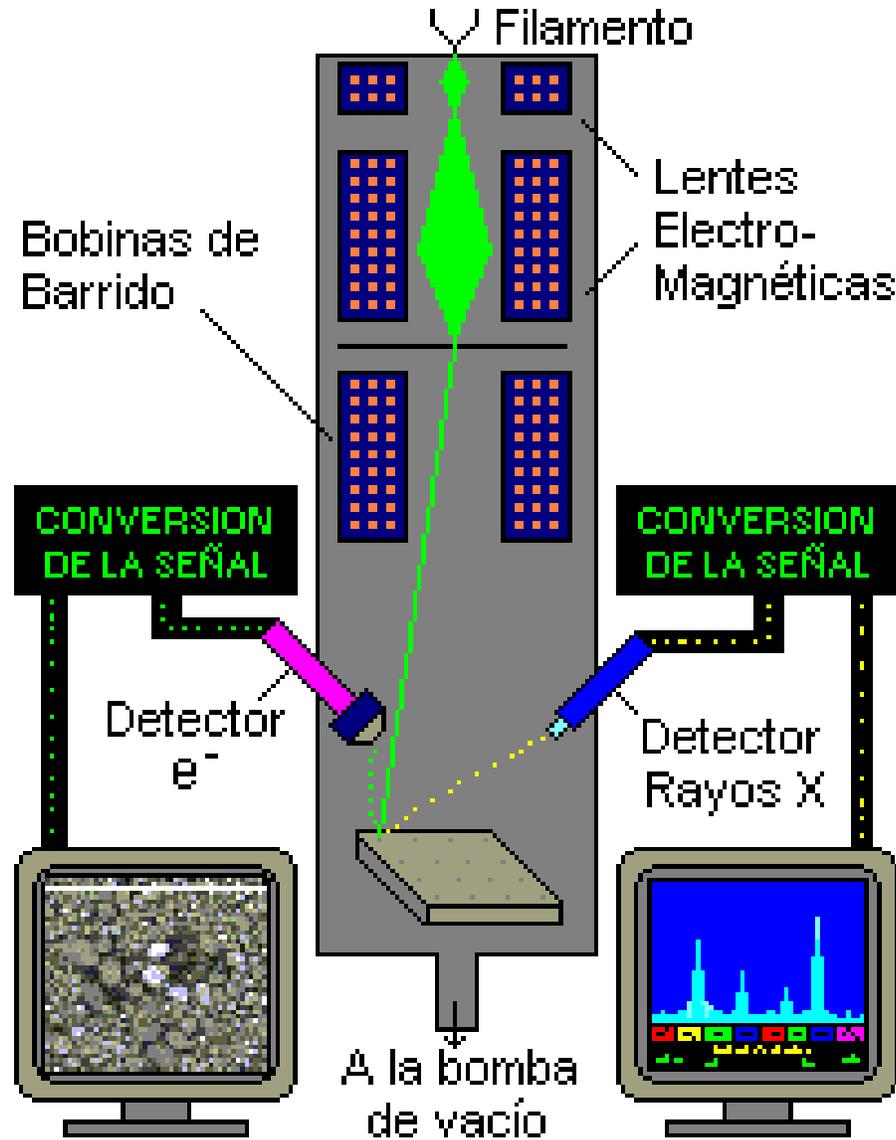


Figura 8.3.- Componentes de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

El MEB realiza el análisis químico cualitativo y cuantitativo, midiendo la energía y la distribución de intensidad de la señal de rayos X, generados por la interacción del haz de electrones con la superficie de la muestra (Resendiz, 2006).

Los electrones incidentes excitan los átomos de la muestra y generan la emisión de rayos X, con una longitud de onda ( $\lambda$ ) característica de los elementos presentes en la muestra. La intensidad que corresponde a una longitud de onda es proporcional a la concentración relativa del elemento presente en el material (ver Figura 8.4).

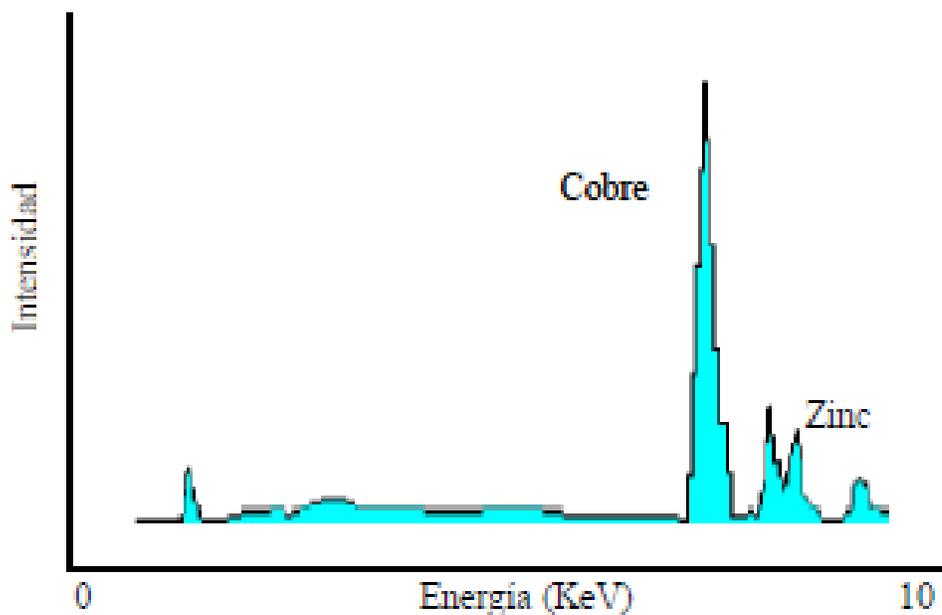


Figura 8.4.- Espectro de rayos X, empleando el MEB.

### 8.5. Geoestadística

El conocimiento de la distribución espacial (se entiende superficial) de oro es una premisa básica en este trabajo. Este conocimiento está intrínsecamente relacionado con la representación gráfica o mapeo de la zona de estudio (cartografía digital y geomática) explicado en la sección siguiente. Ambas aproximaciones metodológicas están incluidas en el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, en este caso, sirven para dar una explicación sobre el fenómeno de dispersión y concentración de este elemento a lo largo del tiempo en la zona e influencia del intrusivo El Calvario, siempre teniendo en cuenta los datos geológicos, geomorfológicos, estratigráficos y de evolución tectónica de la zona.

#### **Análisis exploratorio de los datos muestrales.**

El tratamiento estadístico de los diferentes datos de la variable  $g$  de Au por tonelada es una parte muy importante del estudio geoestadístico y se refiere al estudio de esos datos sin considerar la geolocalización de los puntos de muestreo. La óptima consecución de esta fase del estudio geoestadístico general garantiza una buena estimación de la variable en puntos no

muestrales. Es decir, se estudia la variable mediante métodos estadísticos sin regionalizar la misma. En este análisis exploratorio de los datos se incluyen los siguientes pasos a seguir:

**1. Análisis del tipo de distribución de los datos:** se identifica la normalidad en la distribución de los valores de la variable y, en caso de no existir esa distribución, se incide en las posibles transformaciones de la variable que puedan derivar en la distribución Normal o de Gauss. Posteriormente, se infiere el número de Modas existentes en la muestra. Se recuerda que en este estudio no se tiene una población de la cual se deba extraer una muestra, es al contrario: para una muestra dada hay que determinar si existen una o varias poblaciones de g de Au por tonelada. A partir de la construcción de un histograma, se puede verificar si, en cada población, los datos representan:

- 1) una distribución Gaussiana o Normal (simétrica tipo campana);
- 2) una distribución Gaussiana o normal sesgada o asimétrica. El valor del coeficiente de asimetría es un Momento de tercer orden o “Skewness”:

$$s_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i} \cdot \sqrt{\frac{3}{n}}$$

El valor ideal es 0, caso que significa que la distribución Normal es simétrica. Se recuerda que la función que define esta distribución tiene una densidad de  $-\infty$  a  $+\infty$ ; por tanto, para muestras relativamente pequeñas, se deben tomar con precaución las propiedades de la Distribución Normal. En estos casos, cuando el índice de Skewness es elevado (muy negativo o muy positivo) la interpretación del histograma como una distribución normal puede derivar en un error estadístico que debe ser evitado. Para evitarlo podemos identificar de antemano una distribución muy sesgada positivamente como una distribución logarítmica y hacer la conversión de la variable a su logaritmo para encontrar una distribución normal. De la misma manera, una distribución muy sesgada negativamente (distribución exponencial) se convertiría a Normal al calcular el exponente de la variable estudiada.

**2. Estadística descriptiva:** método para tratar los datos univariados estableciendo las medidas de tendencia central y de dispersión:

**-Medidas de tendencia central:**

- Media, valor promedio o Media aritmética: Parámetro de Momento tres más común para expresar la tendencia central de un conjunto de datos.

- Mediana: Valor central cuando el número de observaciones o valores de muestras es impar, y para un número de valores par, la mediana es la media de los dos valores centrales.
- Moda: Valor observado más frecuentemente en un conjunto de datos. Dos o más modas pueden estar presentes en un conjunto de datos y representa un problema para usar este parámetro como una medida de la tendencia central.
- Cuartil medio o promedio: media de los cuartiles inferior y superior. Ordenando los datos muestrales en una serie que vaya del valor más pequeño al más grande ( $x(1), x(2), x(3), \dots, x(n-2), x(n-1), x(n)$ ), el cuartil superior Q1 se define como aquel dato que representa el 25 % de las medidas y el cuartil inferior Q3 como el que representa el 75 % de las medidas. Cuando en un arreglo no se puede ubicar el dato 25% y 75%, existen dos maneras de resolver el valor de los cuartiles. El primero es hacerlo de manera aproximada, dando el valor de cuartil superior e inferior como los valores muestrales más cercanos de la serie. El otro procedimiento consiste en evaluar el valor extrapolado entre los dos valores de la serie que “rodean” a la posición del cuartil. El cuartil medio ( $Q_m$ ) o promedio es la media entre los cuartiles inferior y superior.

#### **-Medidas de dispersión:**

- Intervalo total (R): este valor representa el total del intervalo que abarcan los datos experimentales. Esta medida de dispersión es muy sensible a la presencia de valores desviados. Por lo tanto, se recomienda no usarla cuando los datos no son normales.
- Intervalo intercuartil: también llamada distancia intercuartil (RQ); se define como la diferencia entre el cuartil inferior Q3 y el cuartil superior Q1. Se le considera como una medida robusta de dispersión ya que no depende de los datos desviados que generalmente se encontrarían fuera de este intervalo.
- Desviación estándar: Es una medida basada en el método de los valores desviados. Por lo que los datos experimentales deben ser normales para evitar una estimación de la dispersión más amplia que para los datos normales. Existen dos maneras de calcular la desviación estándar:

1. Se refiere a una muestra estadística sacada de una población, y se puede estimar como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

2. La desviación estándar correspondiente a la población, la cual es un concepto teórico para el estudio de los datos experimentales. Denominada como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

· Error estándar de la desviación estándar: Expresa la variabilidad de la desviación estándar.

Al incrementar el número de observaciones el error estándar de la desviación estándar disminuirá, lo que significa que la desviación estándar se ha determinado mejor con un número menor de observaciones; sin embargo el error estándar disminuirá hasta cierto grado y no indefinidamente.

· Coeficiente de variación: Es una medida relativa de la dispersión y representa el valor relativo de la desviación estándar con respecto a la media, por lo que no depende de la unidad de la medición.

### **Correlación Espacial.**

Es el análisis de cómo una propiedad cuantitativa varía de acuerdo con los ejes de coordenadas; entre las funciones que se utilizan para analizar la correlación están el variograma o semivariograma, el cual es también útil para conocer o predecir la variable medida en puntos ubicados a distancias conocidas, pero que no fueron muestreados.

### **Variograma.**

El variograma es la medida de la rapidez con que cambian dos rasgos, en promedio. Por lo que dos observaciones cercanas serán más similares que dos que se encuentren más alejadas. Los valores pueden cambiar más rápidamente en una orientación que en otra, por lo que el variograma es una función de la dirección.

Es una función tridimensional:

- Dos variables independientes: la dirección  $\theta$ , y la distancia de separación  $h$ .
- Una variable dependiente: el valor del variograma  $g(\theta, h)$ .

El variograma (gráfico X, Y) es un trozo radial del grid del variograma, es decir, un variograma experimental direccional está asociado a una sola dirección. Por lo tanto, el modelo del variograma debe ser aplicable a todas las direcciones.

### **Definición matemática del variograma.**

$$g(\Delta_1, \Delta_2) = \frac{1}{2} \left( \epsilon(\Delta_1) + \epsilon(\Delta_2) - \epsilon(\Delta_1, \Delta_2) \right)$$

Donde:

$Z(x, y)$ : valor de las variables de interés en la ubicación  $(x, y)$ .

$e[ ]$ .- operador estadístico.

El variograma  $g(h)$  es una función de la separación entre los puntos  $(D_x, D_y)$ , y no es una función de una ubicación específica  $(x, y)$ .

### **8.6. Cartografía geológica y mapas de isoconcentración**

La cartografía el área de estudio se realizó con base en la carta topográfica denominada *San Nicolás* con código de clasificación F14C59, la cual fue editada por la Coordinación Nacional de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática de la Secretaría de Programación y Presupuesto en 1983. Para el reconocimiento y levantamiento geológico se utilizó de base la carta geológico – minera F14C59 editada por el Servicio Geológico Mexicano en 2001; se utilizó el programa ArcGis 9.3 para editar, modificar y plasmar el levantamiento geológico realizado en el área de estudio.

Se realizó un krigeado para poder determinar los valores de Au en las zonas con poca densidad de muestreo, posteriormente se construyeron los mapas de contornos (mapas de isoconcentración), esta metodología se aplicó en el programa Surfer 9.0.

# 9. PETROLOGÍA

## 9.1. PETROLOGÍA

### 9.1.1. Petrología del granitoide de la mina Nuevo Encino Prieto (Muestra JANEP – 25)

#### Descripción de muestra de mano

Este cuerpo granítico aflora ampliamente en el área de la mina y alrededores, tiene un color gris oscuro (de aspecto diorítico-grabroíco), es de grano medio (milimétrico) en el que se pueden apreciar feldespatos, biotita, anfíbol y minerales opacos de grano fino. Se observa con claridad el contacto que éste forma con las rocas carbonatadas de la Formación El Abra, presenta una mineralogía calcosilicatada de skarn con granate, diópsido, calcita y cuarzo y mineralización de mena con sulfuros, tipo pirita, calcopirita, esfalerita, galena y bornita, además de óxidos como magnetita, hematita y goetita. Ver Figura 10.1.

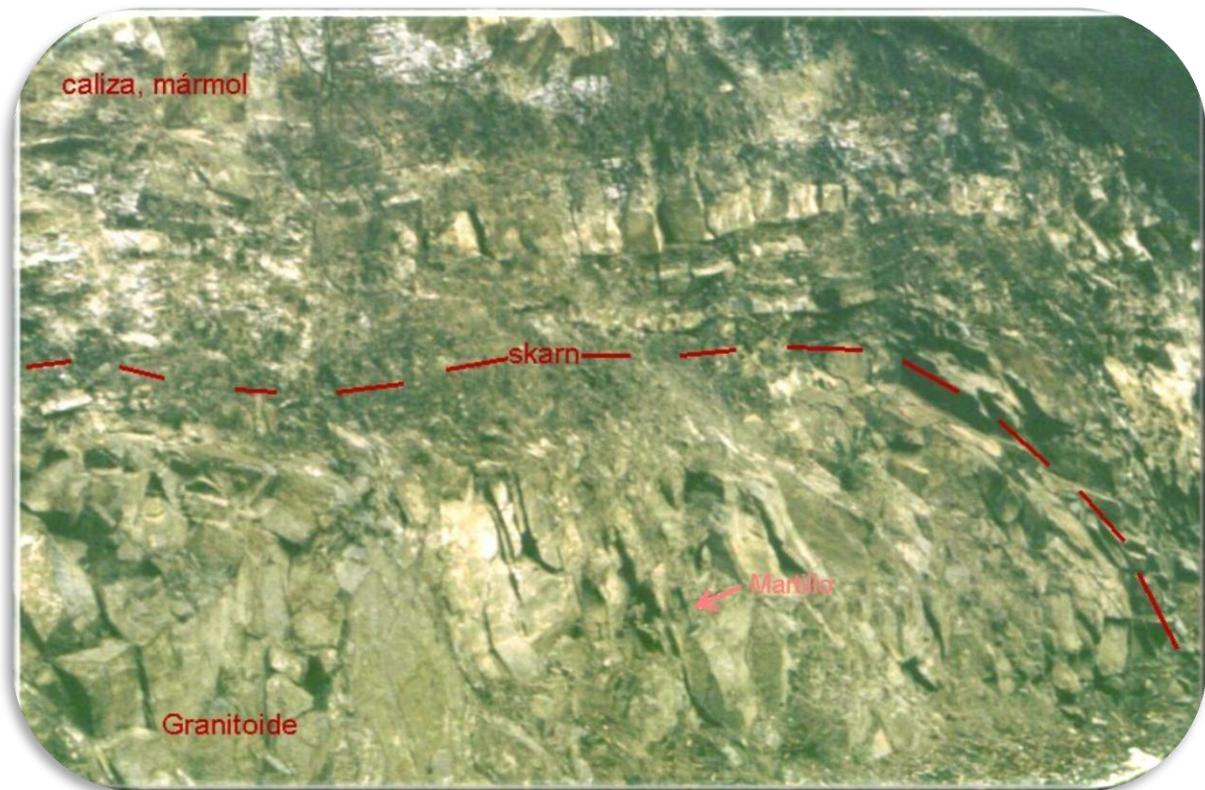
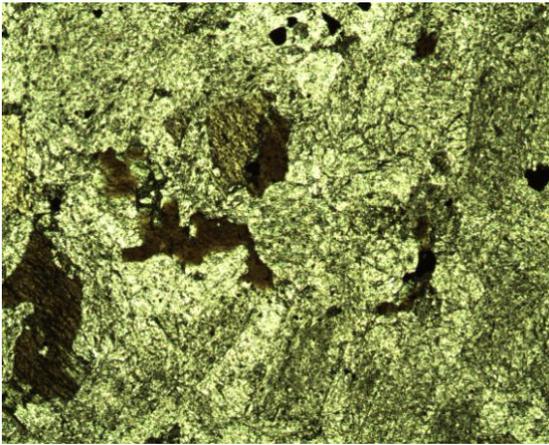


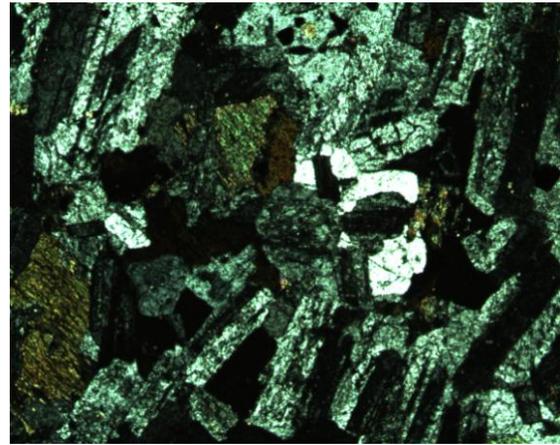
Figura 9.1.- Granitoide JANEP – 25.

## Petrografía

**Textura:** Fanerítica, holocristalina, granular – inequigranular, porfídica, poiquilítica e intersticial. La muestra está formada por un mosaico inequigranular, compuesto por plagioclasa con macla principalmente polisintética, abundante anfíbol y biotita de reemplazamiento y ligeramente esquelética, feldespato potásico intersticial y ocasionalmente poiquilítico, además de minerales opacos (magnetita - ilmenita), titanita, cuarzo, apatito y zircón.



**Figura 9.2.-** Imagen en luz paralela de la muestra JANEP-25 que muestra un mosaico holocristalino porfídico que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 9.3.-** Imagen en nicoles cruzados de la muestra JANEP-25 que muestra un mosaico holocristalino porfídico que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .

**Minerales esenciales:** Se presentan plagioclasas equigranulares con formas que van de tabulares a granulares, presentándose subhédricas y anhédricas. De acuerdo con el método de Michel-Levy se determinó que hay especies de tipo anortosita, labradorita y muy poca albita; en su mayoría estos minerales se presentan sin alteración y las que se alteran presentan pequeños reemplazamientos de muscovita. Otro mineral esencial que es menos abundante es el feldespato potásico siendo de tipo ortosa, la mayoría de los feldespatos se presentan anhédricos ligeramente fracturados y sin reemplazamiento mineral.

**Minerales accesorios:** En cuanto a minerales accesorios se observaron en gran medida biotita muy fibrosa reemplazando clinopiroxenos como es el caso de augita férrica. Intercreciendo a estos dos minerales se presenta clorita que en algunos casos reemplaza totalmente a la biotita lo que puede indicar una etapa posterior de alteración probablemente por hidrotermalismo. Hornblenda anhédrica se presenta relacionada a los piroxenos monoclinicos. El Cuarzo es observado en menor concentración que los anteriores, anhédral y subredondeado sin fracturas. Muy escaso hay Apatito y Zircón, al igual que minerales opacos como es el caso de Magnetita, Ilmenita, y Pirita esta última identificada por su hábito cristalino. Los óxidos metálicos son anhédricos y subredondeados formados a partir de los minerales ferro – magnesianos como los piroxenos, además de la biotita y clorita.

#### **Análisis modal del granitoide de la Mina Nuevo Encino Prieto**

Minerales en JANEP	C. Puntos	%	* $\rho$	Peso = $\rho*v$	% $P_{\text{recalc. a 100}}$
<b>Anfíbol</b>	<b>475</b>	18.91	3.13	<b>59.19</b>	20.74
<b>Plagioclasa</b>	<b>1346</b>	53.58	2.63	<b>140.92</b>	49.39
<b>Feldespato K</b>	<b>30</b>	1.19	2.60	<b>3.11</b>	1.09
<b>Cuarzo</b>	<b>135</b>	5.37	2.65	<b>14.24</b>	4.99
<b>Biotita</b>	<b>425</b>	16.92	2.91	<b>49.23</b>	17.25
<b>Apatito</b>	<b>16</b>	0.64	3.10	<b>1.97</b>	0.69
<b>Titanita</b>	<b>2</b>	0.08	3.77	<b>0.28</b>	0.1
<b>Min. Opacos</b>	<b>74</b>	2.95	5.20	<b>15.32</b>	5.37
<b>Clorita</b>	<b>7</b>	0.28	2.60	<b>0.72</b>	0.25
<b>Zircón</b>	<b>2</b>	0.08	4.60	<b>0.37</b>	0.13
<b>Total</b>	<b>2512</b>	<b>100.00</b>		<b>285.35</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 9.1.-** Análisis modal de JANEP.

**Clasificación:** Aplicando el diagrama de Streckeisen, 1976, esta roca se clasifica como cuarzodiorita. Ver Figura 9.4.

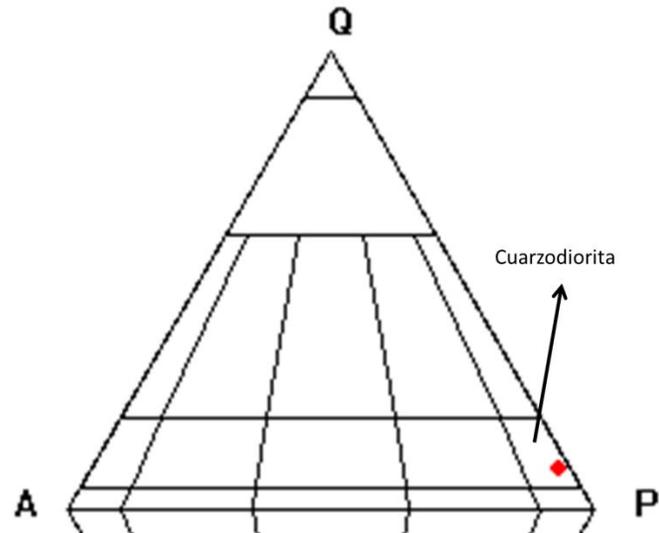


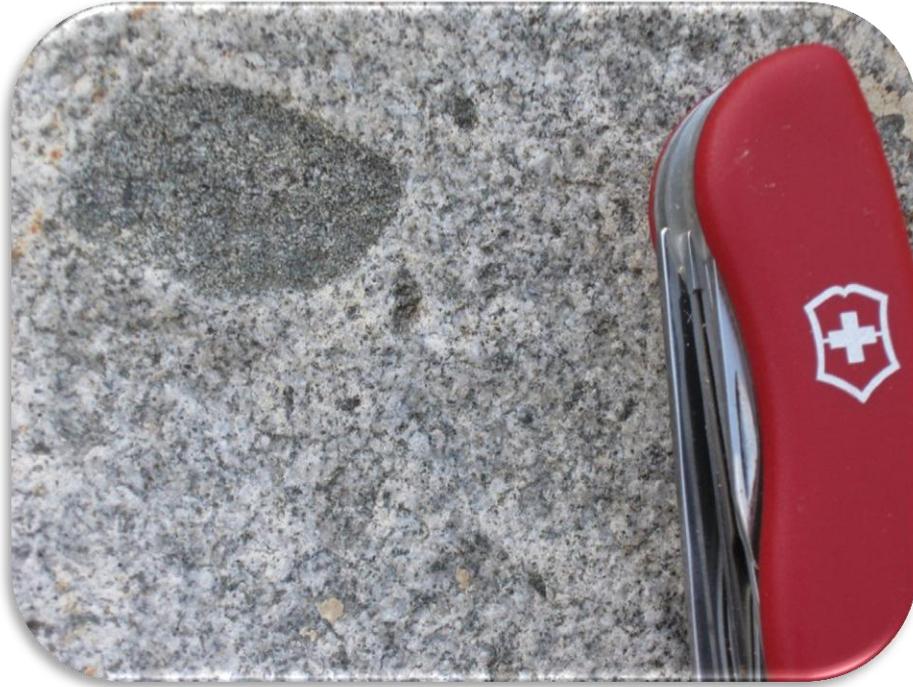
Figura 9.4.- Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JANEP – 25.

**Nombre:** *Cuarzodiorita de biotita y hornblenda.*

### 9.1.2. Petrología del granitoide del arroyo “El Refugio” (Muestra JAAR – 16)

#### Descripción de muestra de mano

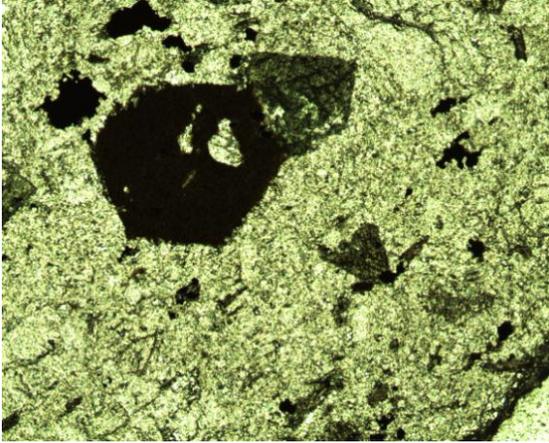
La roca granítica se puede observar al llegar a la zona de las minas y su afloramiento está restringido a esta parte del arroyo. Este granitoide se presenta de forma masiva, se encuentra relativamente poco fracturado y exhibe roca fresca. A simple vista el plutón muestra aspecto de intemperismo de color gris-oscuro, algo marronoso, que hace que la roca se confunda con calizas masivas de la Formación El Abra, que son su encajante. Al corte, la roca granítica exhibe una tonalidad gris-claro y parcialmente verdoso por la cloritización incipiente que presenta. En la roca destacan los feldespatos, anfíbol, biotita, minerales opacos y clorita. Además incluye comúnmente numerosos enclaves, de naturaleza diorítica, de un tamaño centimétrico. Su morfología es redondeada a ovoide y no presentan alineamiento alguno.



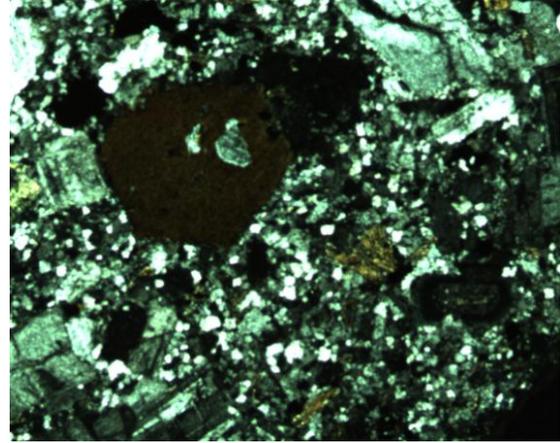
**Figura 9.5.-** Granitoide JAAR – 16, presencia de un enclave de naturaleza diorítica.

### **Petrografía**

**Textura:** Fanerítica, holocristalina, inequigranular, porfídica, hipidiomorfica-granular e intersticial. La muestra está constituida por agregados cristalinos de cuarzo que contienen plagioclasas y feldespatos potásicos, con menor contenido de minerales de alteración con respecto a JANEP-25, y de igual forma se presentan clorita reemplazando a biotita. Presenta anfíboles particularmente hornblenda y relacionado a esta acmita, además de ilmenita que intercrece a estos minerales, acompañada de minerales opacos como magnetita, titanita e ilmenita.



**Figura 9.6.-** Imagen en luz paralela de la muestra JAAR-16 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 9.7.-** Imagen en nicoles cruzados de la muestra JAAR-16 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .

**Minerales esenciales:** Se presentan principalmente agregados de cuarzo microcristalino equigranular, muy poco fracturados y anhédricos subredondeados, los cuales contienen xenocristales de plagioclasa zoneada concéntrica siendo de anortita a labradorita, además de algunas plagioclasas con macla polisintética (albita), intercreciendo a estos minerales se tiene feldespato sanidino generalmente subhédral y con formas tabulares; en ninguno de los feldespatos se observó reemplazamiento mineral aunque se tiene un fracturamiento considerable y la presencia de exclusiones como es el caso de texturas pertíticas. La presencia de plagioclasa zoneadas y texturas de exsolucion evidencian la presencia de diferentes eventos magmáticos que aportaron minerales relicticos.

**Minerales accesorios:** Como minerales accesorios se tiene un decremento en los minerales ferro-magnesianos con respecto a la muestra JANEP – 25, de igual forma se tiene biotita y hornblenda, además del piroxeno acmita, se puede observar que en menor medida se presenta cloritización de algunos minerales y también se presenta ilmenita.

## Análisis modal del granitoide JAAR – 16

Minerales en JAAR – 16	C. Puntos	%	* $\rho$	Peso = $\rho*v$	% P <sub>recalc.</sub> a 100
Anfíbol	413	28.62	3.13	89.58	31.92
Plagioclasa	767	53.15	2.63	139.79	49.81
Feldespato K	186	12.89	2.60	33.51	11.94
Cuarzo	5	0.85	2.65	0.92	0.33
Biotita	25	1.73	2.91	5.04	1.80
Apatito	4	0.28	3.10	0.86	0.31
Titanita	10	0.69	3.77	2.43	0.86
Min. Opacos	12	0.83	5.20	4.32	1.54
Clorita	18	1.25	2.60	3.24	1.16
Zircón	3	0.21	4.60	0.96	0.34
<b>Total</b>	<b>1443</b>	<b>100.00</b>		<b>280.66</b>	<b>100.00</b>

Tabla 9.2.- Análisis modal de JAAR – 16.

**Clasificación:** Aplicando el diagrama de Streckeisen (1976), esta roca se clasifica como monzodiorita (ver Figura 9.8).

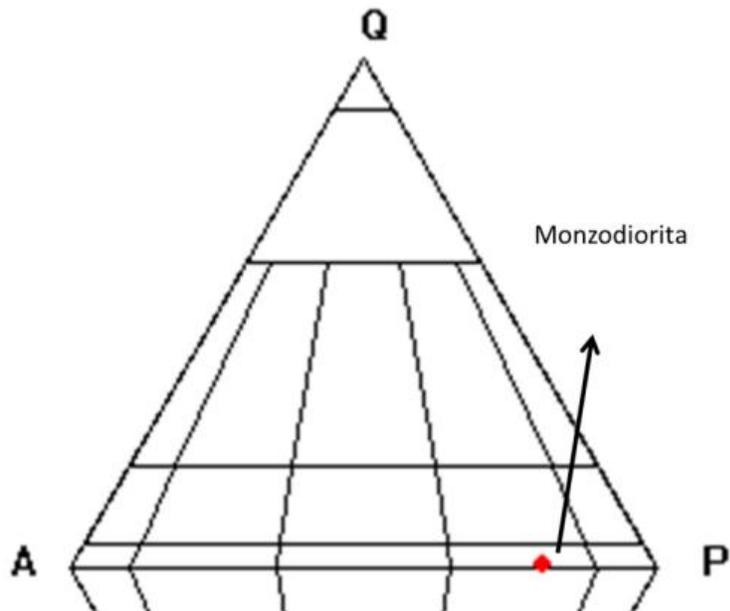


Figura 9.8.- Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JAAR – 16.

Nombre: Monzodiorita de biotita y acmita.

### 9.1.3. Petrología del granitoide de “Santo Domingo” (Muestra JASnDNF – 22)

#### Descripción de muestra de mano

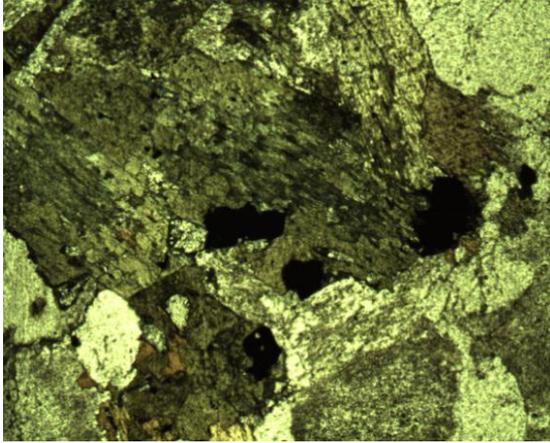
El granitoide JASnDNF – 22 a simple vista podría corresponder con granodiorita, es de un color gris-claro en el que se distinguen claramente feldespatos, cuarzo, anfíbol, minerales opacos y biotita. La roca es fresca y presenta poca fracturación. Ver Figura 9.9.



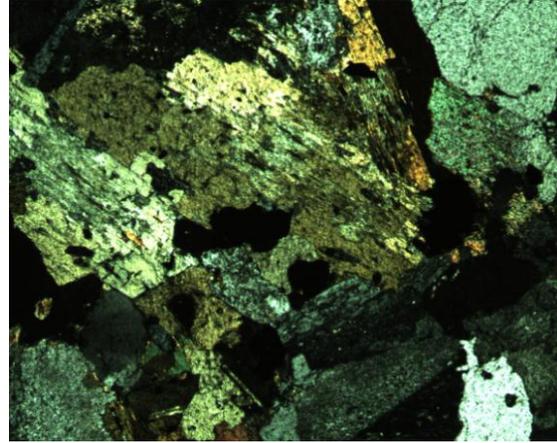
Figura 9.9.- Granitoide JASnDNF – 22.

#### Petrografía

**Textura:** Fanerítica, holocristalina, equigranular, alotriomorfica-granular e intersticial. Muestra en su mayoría conformada por un mosaico equigranular de cristales de feldespato y cuarzo, ligeramente fracturados, abundantes piroxenos sobre todo hiperstena, augita y diópsido con texturas esqueléticas; hay muy pocos minerales de secundarios como es el caso de clorita, biotita ambas fibrosas, además de muscovita en agregados cristalinos.



**Figura 9.10.-** Imagen en luz paralela de la muestra JASnDNF-22 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 9.11.-** Imagen en nicoles cruzados de la muestra JASnDNF-22 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .

**Minerales esenciales:** Se tienen feldespatos potásicos, sobre todo ortosa, acompañados de cuarzo, ambos anhédrales y algunos subhédrales, muy poco fracturados; los feldespatos presentan exclusiones microscópicas pudiendo ser antipertíticas. A diferencia de las dos antes descritas destaca la ausencia de fenocristales de plagioclasa y la escasa alteración aunada reemplazamiento mineral.

**Minerales accesorios:** Se observa hiperstena anhédrica relacionada a la cristalización posterior de augita y diópsido, que en conjunto han dado pauta a la formación de filosilicatos como es el caso de biotita que va de tabular a fibrosa; este último mineral ha sido alterado posteriormente, dando lugar a la formación de clorita con colores de interferencia anómalo.

## Análisis modal del granitoide de la Mina Nuevo Encino Prieto

Minerales en JASnDNF –	C. Puntos	%	*ρ	Peso =	% P <sub>recalc.</sub> a 100
Anfíbol	15	0.94	3.13	2.94	1.07
Plagioclasa	825	51.89	2.63	136.47	49.66
Feldespatos K	173	10.88	2.60	28.29	10.30
Cuarzo	345	21.70	2.65	57.50	20.92
Biotita	152	9.56	2.91	27.82	10.12
Apatito	24	1.51	3.10	4.68	1.70
Titanita	9	0.57	3.77	2.15	0.78
Min. Opacos	42	2.64	5.20	13.73	5.00
Zircón	2	0.13	4.60	0.60	0.22
Epidota	3	0.19	3.38	0.64	0.23
<b>Total</b>	<b>1590</b>	<b>100.00</b>		<b>274.82</b>	<b>100.00</b>

Tabla 9.3.- Análisis modal de JASnDNF – 22.

**Clasificación:** Aplicando el diagrama de Streckeisen (1976), esta roca se clasifica como Granodiorita (ver Figura 9.12).

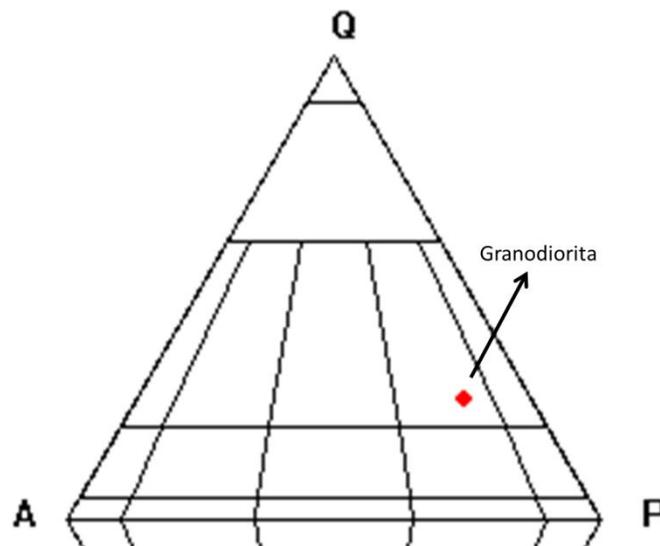


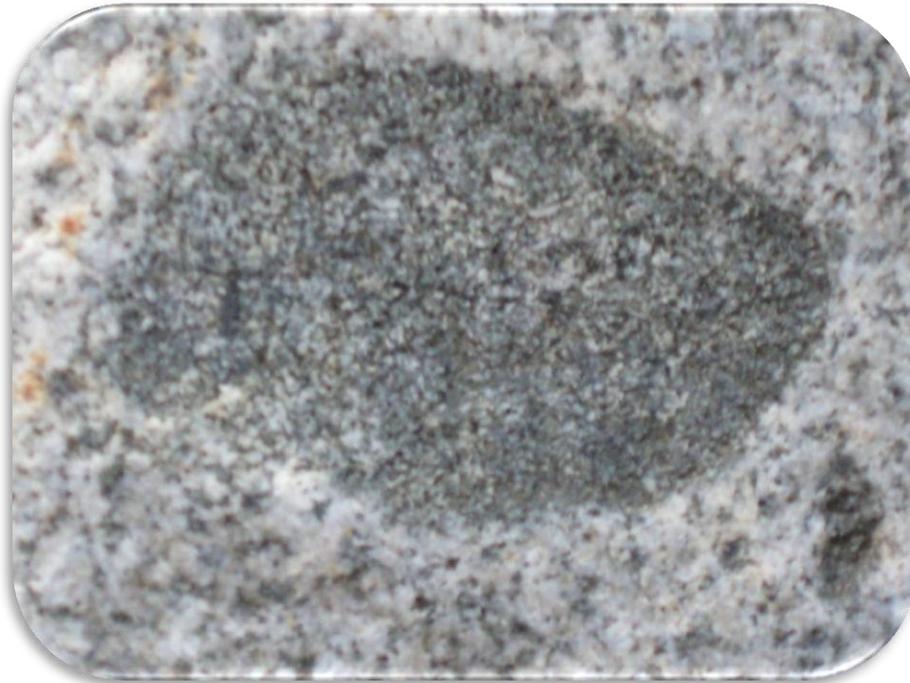
Figura 9.12.- Diagramas de Streckeisen, 1976 de la muestra JASnDNF – 22.

Nombre: *Granodiorita de hiperstena y augita.*

#### 9.1.4. Petrología del enclave 1 localizado en muestra JAAR – 16

##### Descripción de la muestra de mano

Son múltiples los enclaves que se encuentran en la monzodiorita “JAAR – 16”. Son microgranulares y están constituidos de roca plutónica de color oscuro, con formas redondeadas a ovoides de tamaño centimétrico a decimétrico en menor medida (ver Figura 9.13). A simple vista parece tener composición diorítica. Mineralógicamente se encuentran constituidos por abundante plagioclasa, biotita, anfíbol, ortosa y magnetita. La distribución de estos enclaves en el granitoide es irregular, se encuentran ampliamente dispersos en el granitoide y no presentan ninguna lineación entre sí.

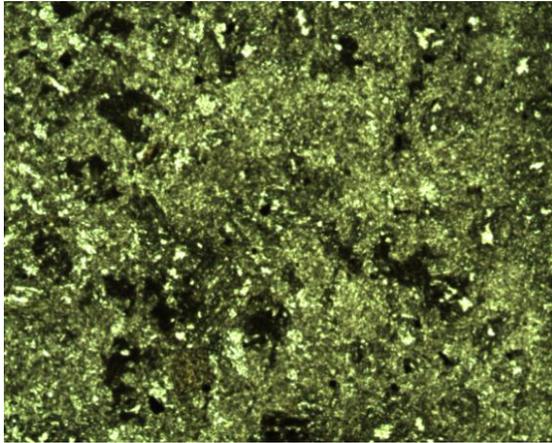


**Figura 9.13.-** Enclave en el granitoide JAAR – 16. Tamaño aproximado del enclave 5 cm.

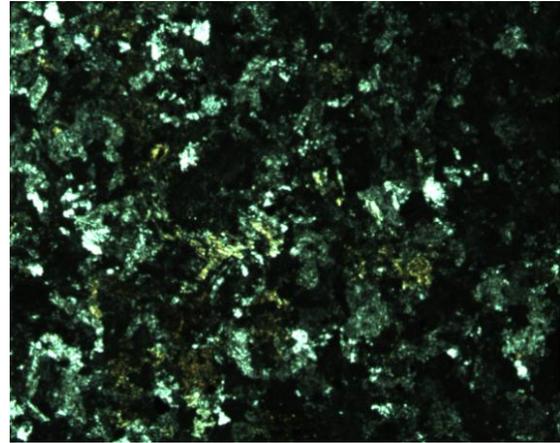
##### Petrografía

**Textura:** Fanerítica, holocristalina, granular – inequigranular, porfídica, alotriomorfica – granular e intersticial. Muestra inequigranular, compuesto por feldespato y cuarzo. Plagioclasa con macla principalmente polisintética, abundante anfíbol y biotita de reemplazamiento y ligeramente esquelética, feldespato potásico intersticial y ocasionalmente

poiquilítico, además de minerales opacos (magnetita - ilmenita), titanita, cuarzo, apatito y zircón.



**Figura 9.14.-** Imagen en luz paralela de la muestra JAAR-16 e1 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita de reemplazamiento, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .



**Figura 9.15.-** Imagen en nicoles cruzados de la muestra JAAR-16 e1 que muestra un mosaico holocristalino que incluye plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda y biotita de reemplazamiento, minerales opacos, cuarzo, titanita, apatito y zircón. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .

**Minerales esenciales:** El mineral principal formador de roca es el feldespato potásico como es el caso de la ortosa, sanidino, subhédrales a anhédrales; se observa esquelético. También se observó cuarzo anhédral sin presencia de fracturas.

**Minerales accesorios:** Como minerales accesorios tenemos minerales de reemplazamiento como son la biotita y clorita que se encuentran reemplazando a los piroxenos, además de minerales opacos ilmenita y pirita.

## Análisis modal del granitoide de la Mina Nuevo Encino Prieto

Minerales en Enclave	C. Puntos	%	*ρ	Peso = ρ*v	% P <sub>recalc.</sub> a 100
<b>Anfíbol</b>	<b>84</b>	15.02	3.13	<b>263.82</b>	15.96
<b>Plagioclasa</b>	<b>222</b>	39.57	2.63	<b>583.76</b>	35.31
<b>Feldespato K</b>	<b>53</b>	9.44	2.60	<b>137.72</b>	8.33
<b>Cuarzo</b>	<b>43</b>	7.61	2.65	<b>113.07</b>	6.84
<b>Biotita</b>	<b>95</b>	17.01	2.91	<b>277.69</b>	16.80
<b>Apatito</b>	<b>15</b>	2.74	3.10	<b>47.5</b>	2.88
<b>Titanita</b>	<b>12</b>	2.06	3.77	<b>43.58</b>	2.64
<b>Min. Opacos</b>	<b>35</b>	6.18	5.20	<b>180.34</b>	10.91
<b>Zircón</b>	<b>1</b>	0.11	4.60	<b>2.90</b>	0.18
<b>Epidota</b>	<b>1</b>	0.15	3.38	<b>2.84</b>	0.17
<b>Total</b>	<b>561</b>	<b>100</b>		<b>1653.29</b>	<b>100.00</b>

Tabla 9.4.- Análisis modal del enclave en muestra JAAR – 16.

**Clasificación:** Aplicando el diagrama de Streckeisen (1976), esta roca se clasifica como Cuarzomonzodiorita. Ver figura 9.16.

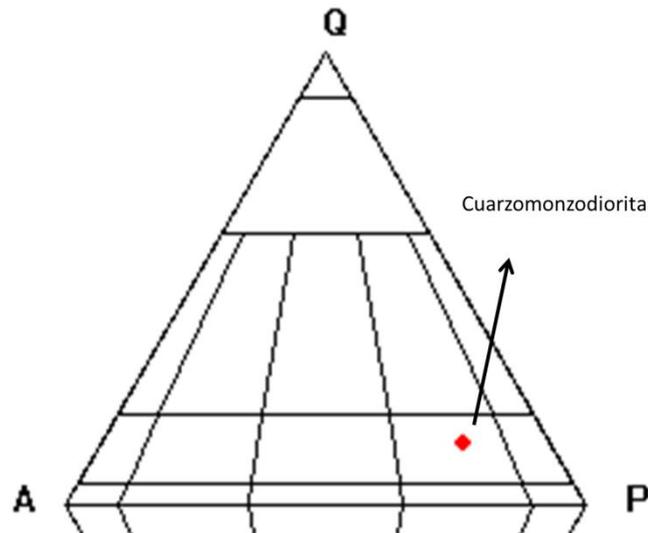
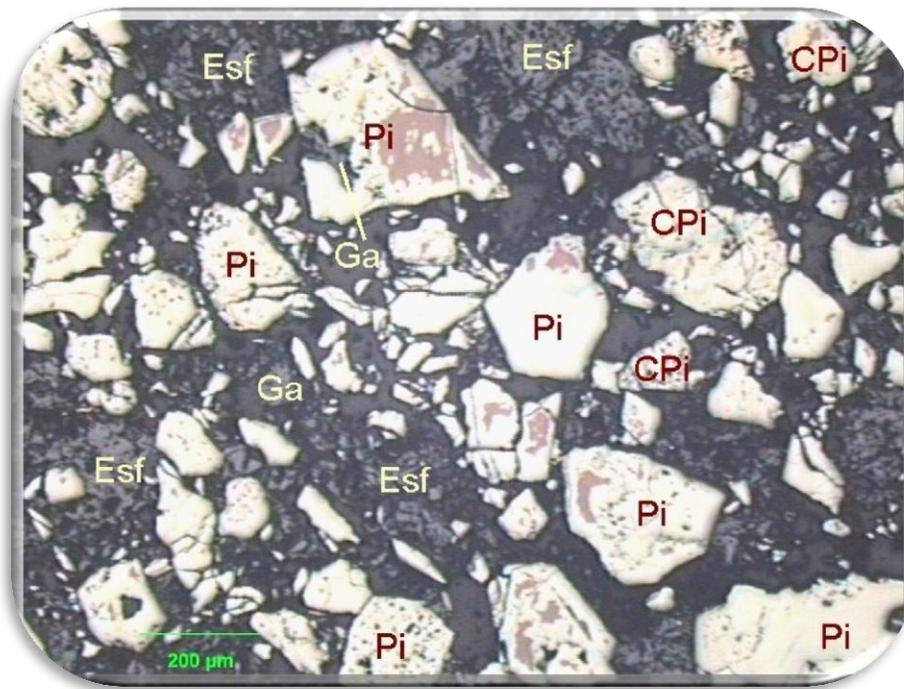


Figura 9.16.- Diagramas de Streckeisen, 1976 del enclave de la muestra JAAR – 16.

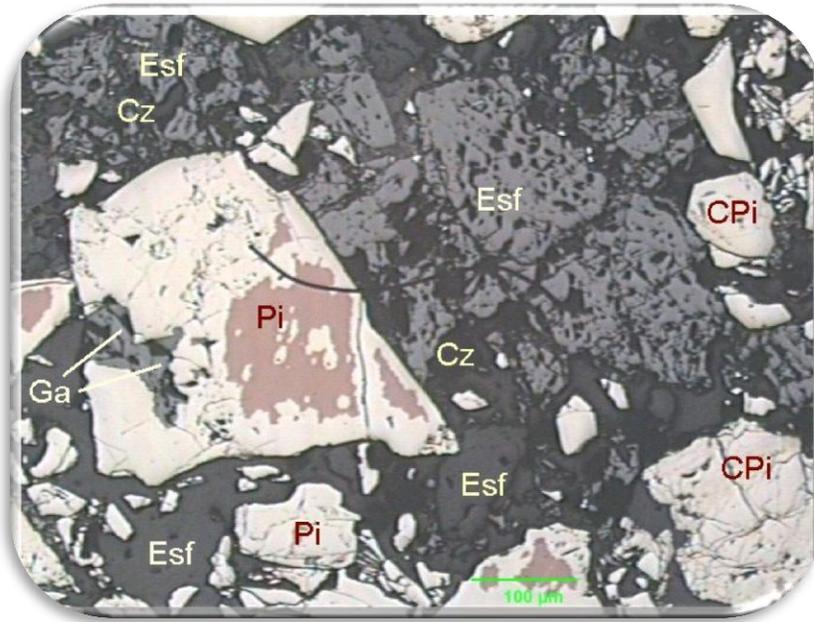
Nombre: *Cuarzomonzodiorita de biotita y hornblenda.*

### 9.1.5. Microscopía electrónica de barrido y microscopía de luz reflejada

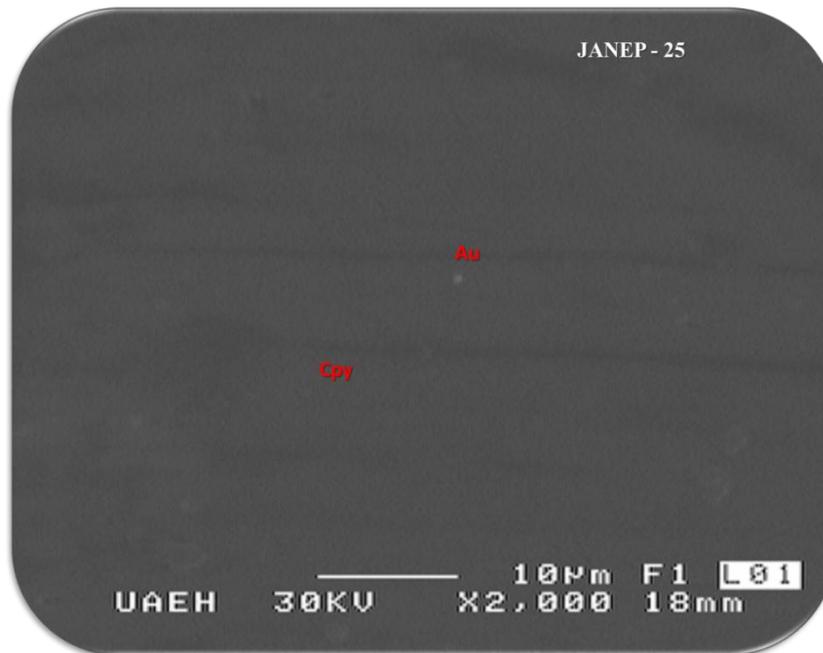
Por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) se caracterizaron pequeñas partículas de 0.5 a 7  $\mu\text{m}$  (Figura 9.19) de diámetro que correspondieron a distintas fases minerales simples (nativas) y complejas; oro nativo y telurio (calaverita), asociación oro plata, telururo de oro con bismuto, incluidas en calcopirita (Figura 9.20). Espectros de rayos X de algunas de las partículas se pueden apreciar en la Figura 9.21 y 9.22. Mediante el microscopio de luz reflejada se observaron algunos minerales como la esfalerita que presenta intercrecimientos de galena y se encuentra en contacto con pirita y calcopirita; ver Figura 9.17 y 9.18.



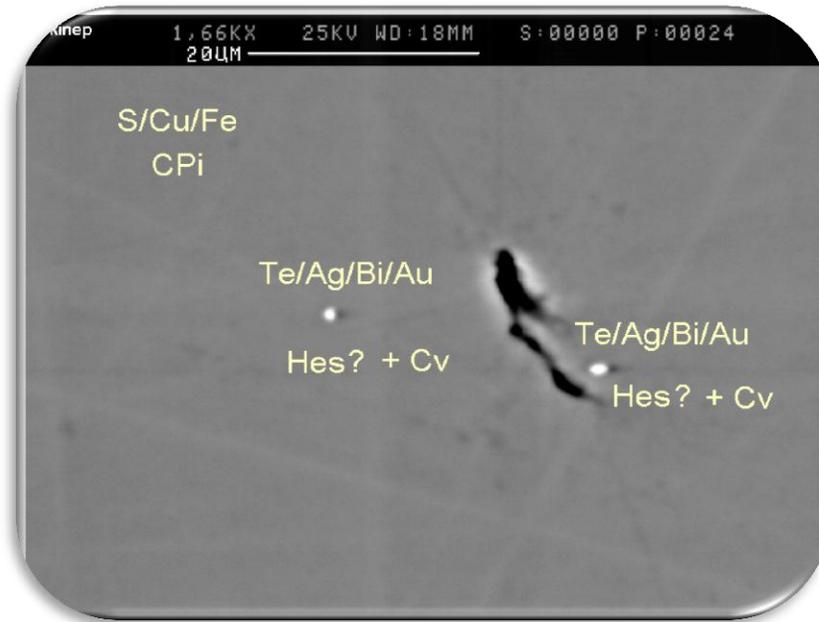
**Figura 9.17.-** Imagen de luz reflejada que muestra un ejemplo de las brechas mineralizadas en la mina “Nuevo Encino Prieto”. Escala gráfica 200  $\mu\text{m}$ .



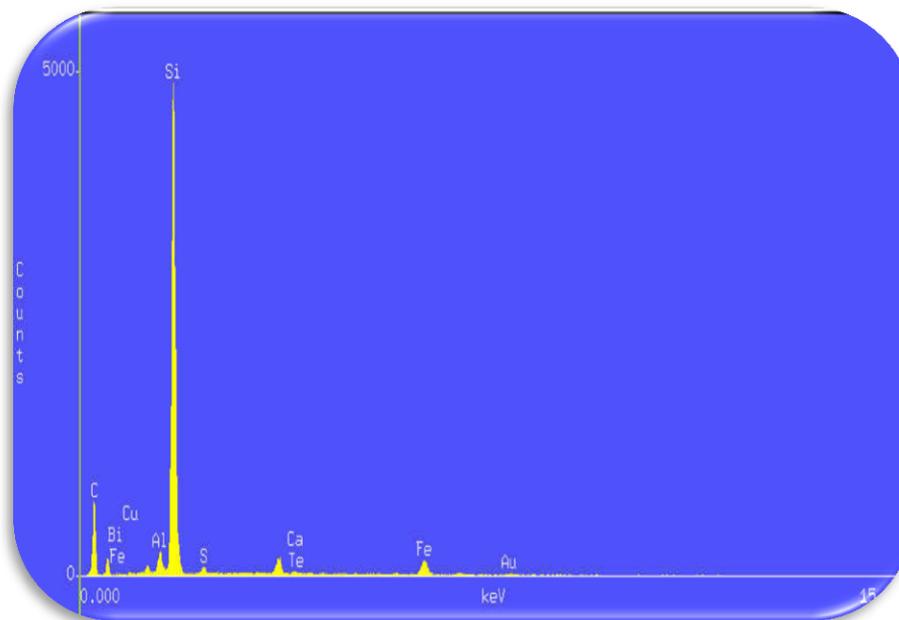
**Figura 9.18.-** Imagen de luz reflejada a detalle de los minerales brechificados: pirita (Pi), esfalerita (Esf), calcopirita (Cpi), galena (Ga) y cuarzo (Cz). Escala gráfica 100 µm.



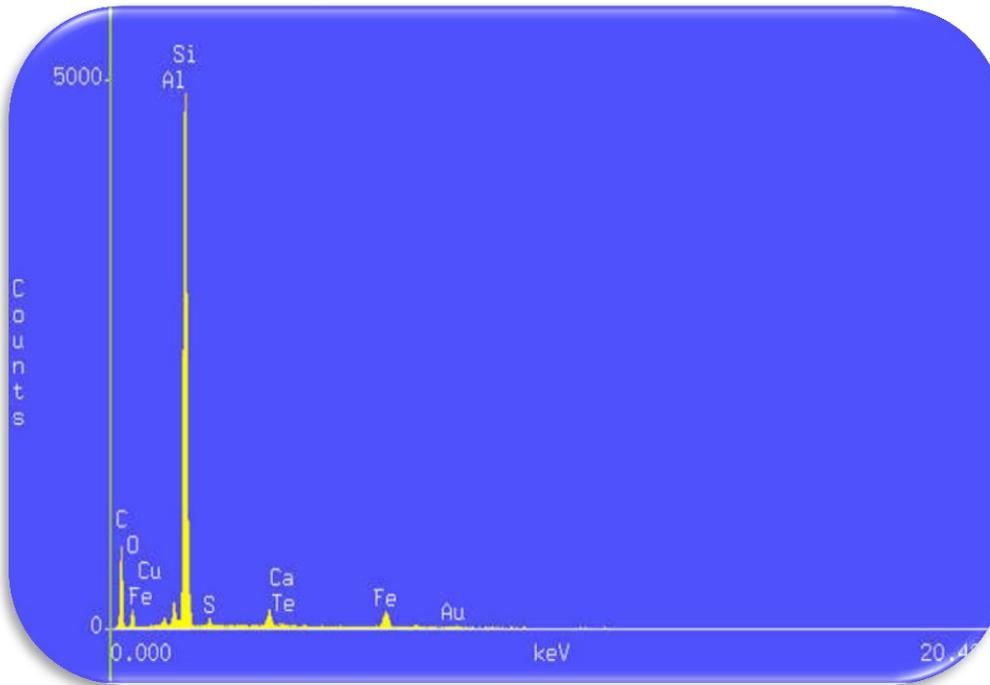
**Figura 9.19.-** Imagen de electrones retrodispersados. Partícula de oro (Au) incluida en una matriz de calcopirita (Cpy). Muestra JANEP – 25 correspondiente a la mina Nuevo Encino Prieto.



**Figura 9.20.-** Imagen de electrones retrodispersados. Teluroides de plata, bismuto y oro que posiblemente correspondan con hessita-matildita-schabachita. (Hes?) y calaverita (Cv), incluidas en calcopirita (Cpi) de la mina “Nuevo Encino Prieto”.



**Figura 9.21.-** Espectro de rayos X obtenido por SEM de una partícula mineral incluida en calcopirita, donde se identificó bismuto y telurio, además de oro nativo.



**Figura 9.22.-** Espectro de rayos X obtenido por SEM de una partícula mineral incluida en calcopirita, donde se identificó telurio y oro nativo.

# 10. GEOQUÍMICA

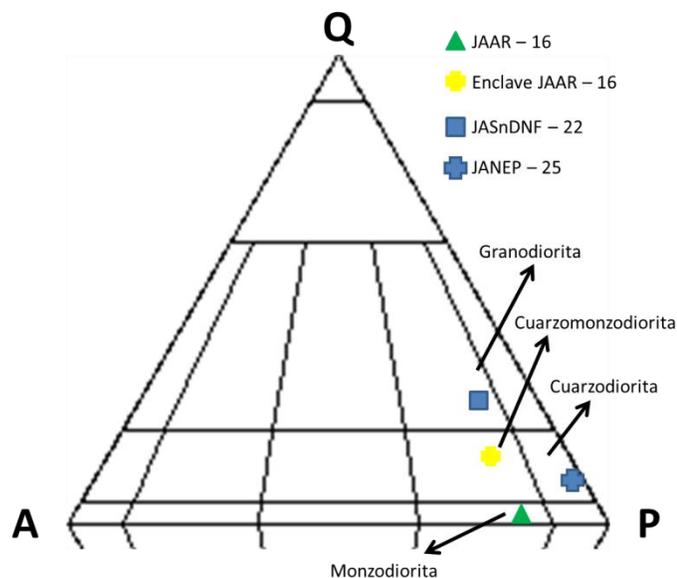
## 10. GEOQUÍMICA

### 10.1. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORITARIOS

Con anterioridad a este trabajo se han realizado varios estudios geoquímicos de elementos mayoritarios en granitoides de La Encarnación, granitoides situados al suroeste del área de estudio, entre los que se encuentran los realizados por MMAJ-JICA, 1982 y en cuyo informe aparecen análisis de granitoides de las localidades Cerro Grande, Plomosas, arroyo El Molinito y de La Encarnación; y más recientemente Flores-Castro, 2001 en la parte noroeste del Estado de Hidalgo, abarcando los granitoides de La Encarnación y de la mina Nuevo Encino Prieto, estos últimos correspondiente a los granitoides de El Calvario. Se construyeron diversos diagramas, ternarios del tipo AFM, R1 & R2, SiO<sub>2</sub> & (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), A & B, SiO<sub>2</sub> & FeOT / FeOT + MgO, SiO<sub>2</sub> & K<sub>2</sub>O.

#### 10.1.1. Diagrama de Streckeisen para la clasificación de rocas intrusivas

Con la utilización del análisis modal efectuado en las muestras de los intrusivos de El Calvario, se aplicó la nomenclatura de clasificación de Streckeisen, 1976 para determinar el nombre de cada una de la muestras y posteriormente conocer si la asociación plutónica representaba alguna serie magmática.

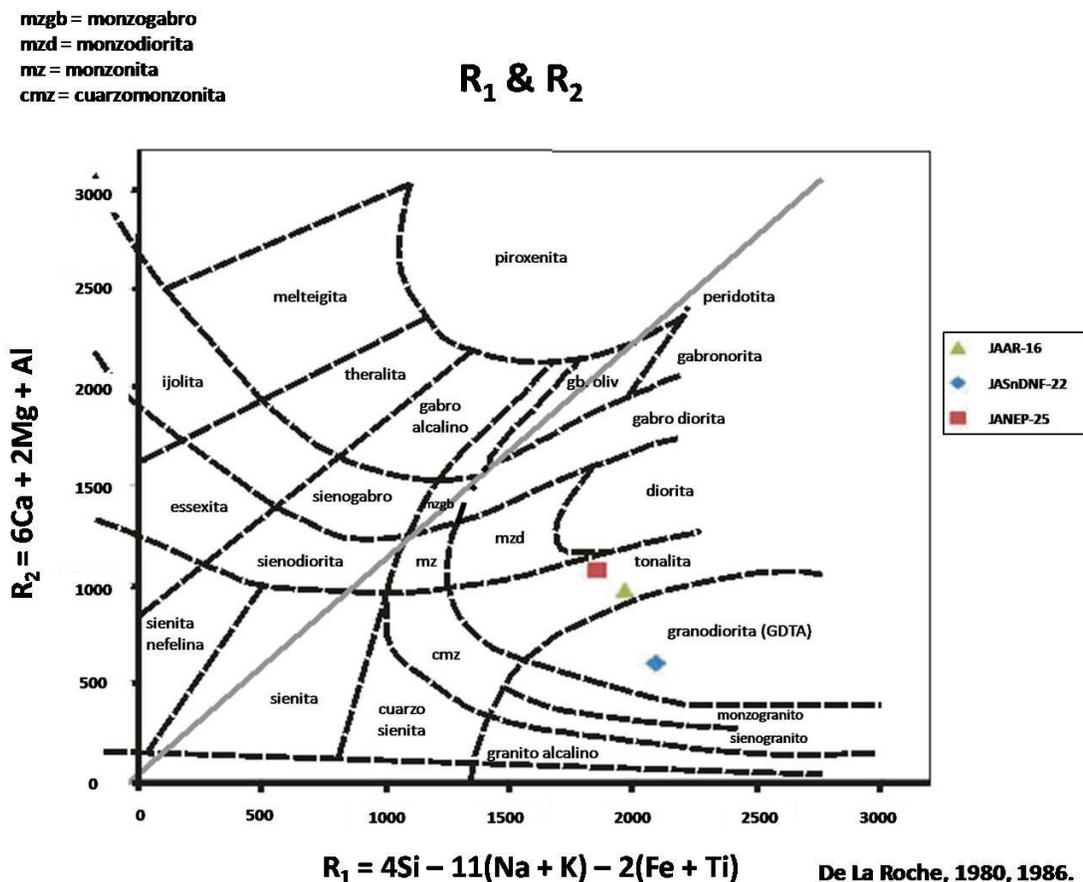


**Figura 10.1.-** Diagrama de clasificación de rocas plutónicas de Streckeisen, 1976 aplicado a los granitoides de El Calvario.

De acuerdo a este diagrama, los distintos litotipos plutónicos relacionados al intrusivo El Calvario son: Granodiorita, Cuarzodiorita, Monzodiorita y Cuarzomonzodiorita (ver Figura 10.1).

### 10.1.2. Diagrama R1 – R2

De la Roche, 1980, 1986 desarrollo un diagrama de clasificación que utiliza los elementos mayoritarios (exceptuando el manganeso) constituyentes de los minerales formadores de rocas ígneas. Los elementos mayoritarios los relaciona respecto al grado de saturación en Sílice y además toma en cuenta la variación entre las relaciones de  $Fe/(Fe+Mg)$  y  $(Ab+Or)/An$ . Los parámetros utilizados son el R1 que es igual a  $4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti)$  y el R2 que es igual a  $6Ca + 2Mg + Al$ . Ver Figura 10.2.

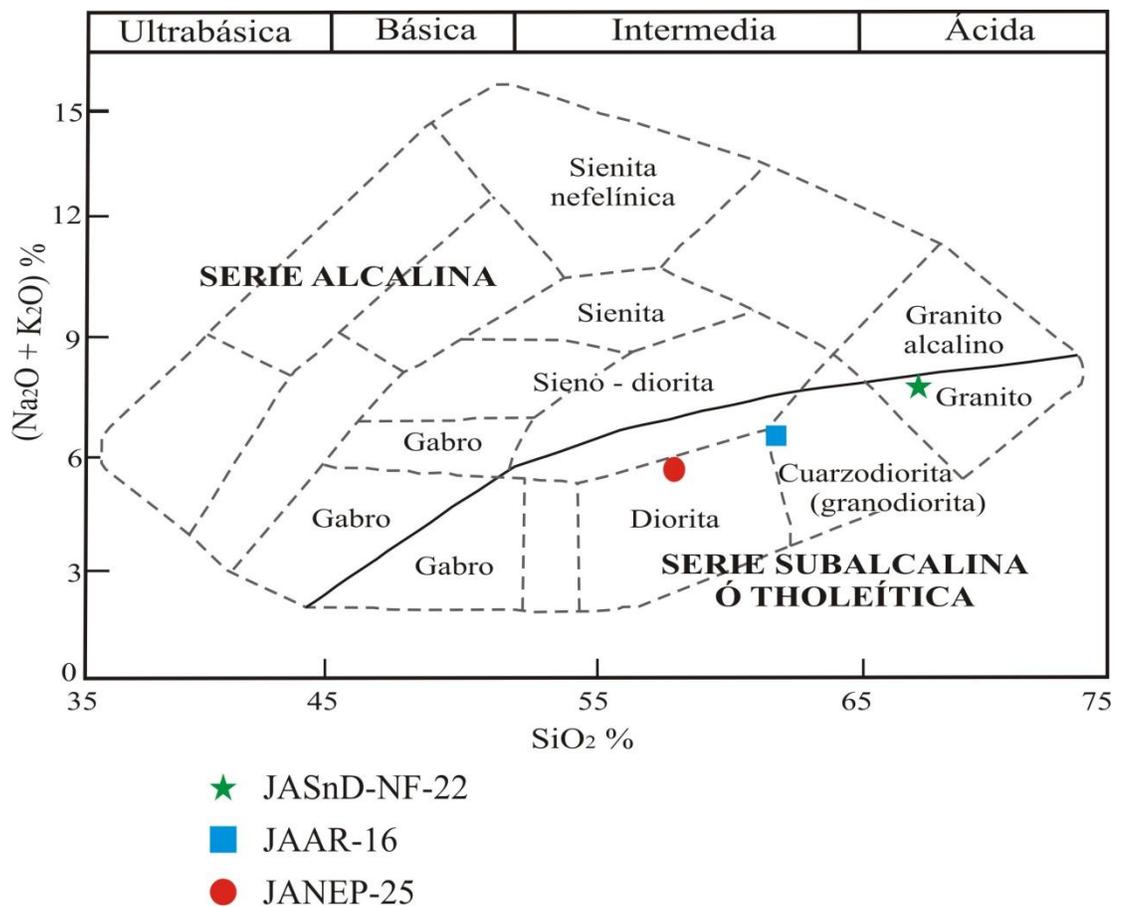


**Figura 10.2.-** Diagrama de clasificación de rocas plutónicas De la Roche, 1980, 1986 aplicado a los granitoides de El Calvario.

### 10.1.3. Diagrama de clasificación de granitoides de Wilson

Wilson, 1982 adaptó el diagrama que Cox, 1979, 1982 desarrolló previamente para rocas volcánicas y lo aplicó a sus correspondientes intrusivos. Al igual, hizo una diferenciación en dos grandes series magmáticas; una para rocas alcalinas y otra para subalcalinas o tholeíticas.

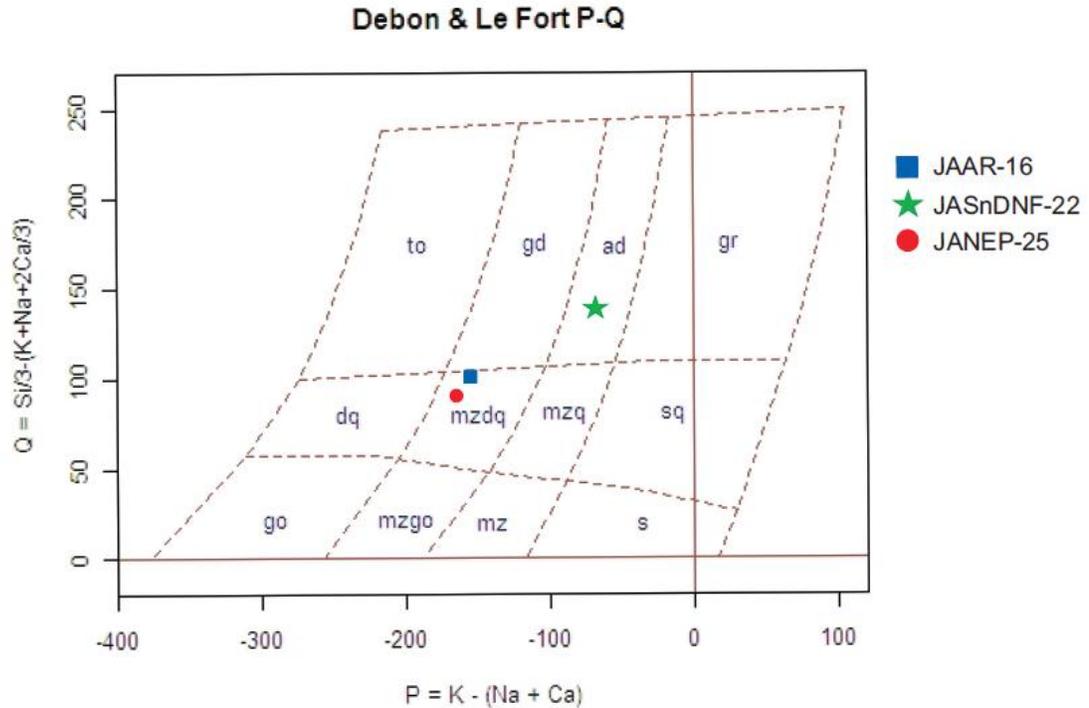
Al aplicar la nomenclatura de Wilson a los litotipos intrusivos de El Calvario, se observa su correspondencia al terreno de la serie subalcalina ó tholeítica, ver Figura 10.3.



**Figura 10.3.-** Diagrama de clasificación de granitoides de Wilson.

### 10.1.4. Diagrama de clasificación de rocas plutónicas de La Roche P & Q

Este diagrama desarrollado por De La Roche, 1964, 1972, 1976, 1978, 1986 basa su principio en la utilización de los parámetros  $Q = \text{Si}/3 - (\text{K} + \text{Na} + 2\text{Ca}/3)$  y  $P = \text{K} - (\text{Na} + \text{Ca})$ . Es un diagrama que permite la clasificación de granitoides comunes e intenta reproducir las relaciones que existen entre los minerales félsicos (ver Figura 10.4).



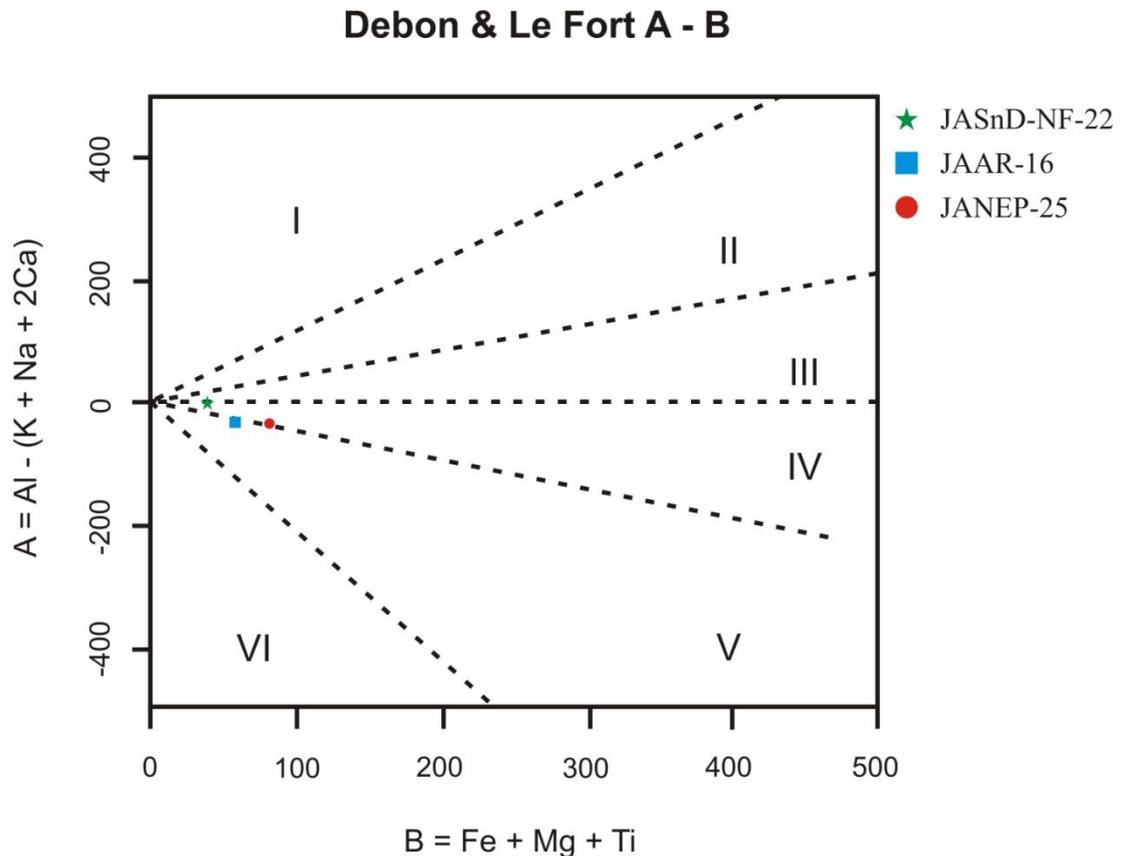
**Figura 10.4.-** Diagrama de clasificación plutónica P & Q de La Roche, (1964, 1972, 1976, 1978, 1986). Donde gd=granodiorita, **mzdq=cuarzomonzodiorita**, mzgo=monzodiorita, monzogabro, to=tonalita, dq=cuarzodiorita, mz=monzonita, mzq=cuarzomonzonita, **ad=adamelita**, gr=granito, sq=cuarzosienita, s=sienita, go=gabro.

### 10.1.5. Diagrama A-B de Debon y Le Fort

Debon & Le Fort, 1983, 1988 desarrollaron un sistema de clasificación de rocas plutónicas y sus asociaciones, basándose en la representación de la composición cationica de los elementos mayores, en una serie de diagramas químico – mineralógicos.

La relación A – B, es una relación bivalente, en la cual se compara el carácter peraluminico – metaluminico que es controlado por le parámetro A y es igual a: Al-

(K+Na+2Ca). El parámetro B, está regido por el contenido en minerales oscuros que es igual a: Fe+Mg+Ti. El diagrama A – B refleja el equilibrio que existe entre los minerales peraluminicos (más o menos ricos en Al), pero pobres o sin Ca, como la biotita, muscovita, aluminosilicatos, cordierita, turmalina, topacio, etc., y los minerales metalumínicos, ricos en Ca y pobres o sin Al, como la hornblenda, augita, diópsido, epidota, titanita, calcita, etc. Un valor del parámetro A superior a cero indica que la roca es peraluminica, similar a cero es subaluminica, e inferior a cero es metalumínica que es el caso de las muestras plutónicas de El Refugio. Ver Figura 10.5.



**Figura 10.5.-** Diagrama A-B de Debon y Le Fort, 1988.

A partir del estudio de la distribución de las rocas plutónicas, los autores de este diagrama hacen diferencia de tres tipos de asociaciones, las cuales son la cafémica, aluminocafémica y la alumínica.

**Asociación cafémica**, presenta pendientes negativas y están situadas total o parcialmente dentro del dominio metalumínico del diagrama A – B y si bien, los miembros más félsicos entran en el dominio peralumínico.

**Asociación aluminocafémica**, presentan pendientes negativas y la mayor parte, o bien, la totalidad de las muestras están situadas en el dominio peralumínico. Si bien, algunos miembros melanocráticos pueden entrar en el dominio metalumínico.

**Asociación aluminica**, pueden presentar pendientes positivas o negativas y se localizan totalmente dentro del dominio peralumínico.

Según estos autores, cada una de las tres asociaciones magmáticas corresponden a un tipo distinto de material fundido. Las asociaciones cafémicas se han formado a partir de una fuente mantélica, las asociaciones aluminocafémicas tienen un origen híbrido, pero con predominio del componente síalico. Las asociaciones aluminicas que derivan esencialmente de la anatexia de materiales síalicos.

Las muestras de los granitoides de El Calvario tienen una marcada tendencia cafémica, significando un origen mantélico según dichos autores; aunque se observa que un litotipo se acerca al dominio aluminocafémico o híbrido lo cual nos plantea que hubo un aporte síalico minoritario.

### 10.1.6. Diagrama AFM

Los granitoides de El Calvario plasmados en el diagrama AFM, forman una serie calcoalcalina con tendencia a ser rica en potasio. Ver Figura 10.6.

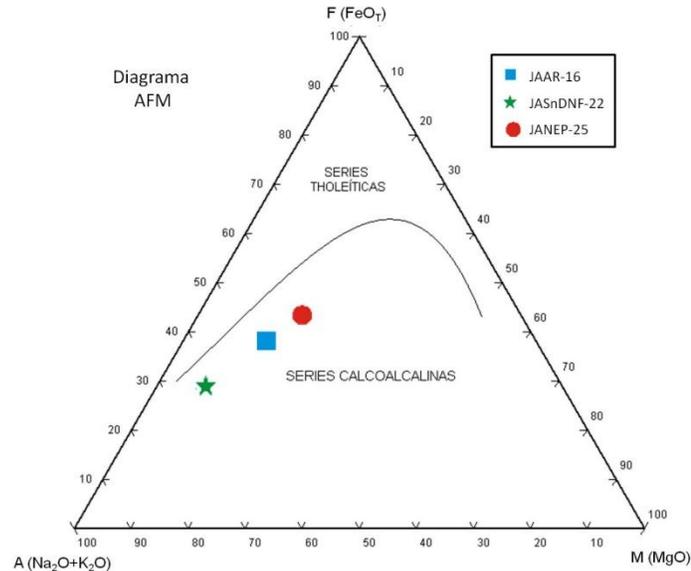


Figura 10.6.- Diagrama AFM, Irvine y Baragar, 1981.

### 10.1.7. Diagrama de Miyashiro

Es utilizado frecuentemente en granitoides donde la cantidad de minerales máficos es importante. Este diagrama indica que posiblemente se tenga una mezcla de series magmáticas, tanto el terreno calcoalcalino como tholeítico (ver Figura 10.7).

SiO<sub>2</sub> & FO<sub>T</sub>/FeO<sub>T</sub>+MgO  
Miyashiro, 1974.

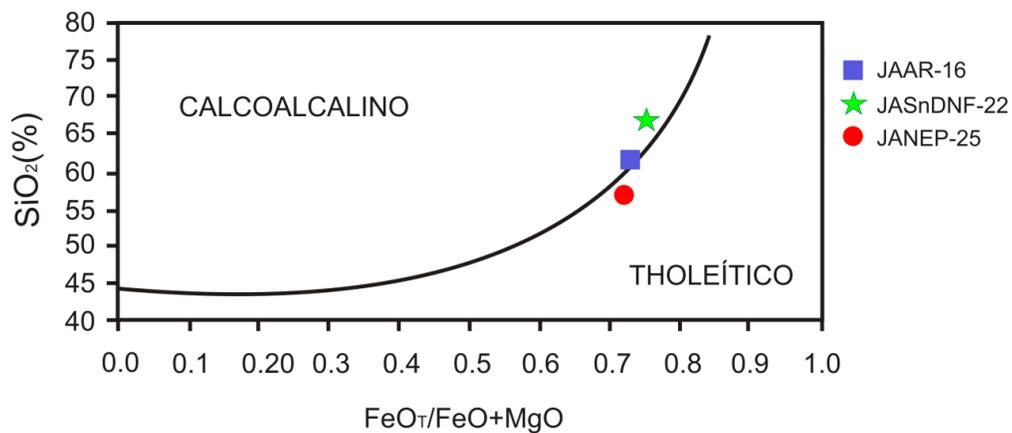


Figura 10.7.- Diagrama de series magmáticas de Miyashiro, 1974.

### 10.1.8. Diagrama de Irvine

El diagrama de Irvine et al., 1971, como discriminador de series alcalinas de las subalcalinas se sigue a la fecha y es una guía útil sobre todo en series calcoalcalinas ricas en potasio. Características que presentan los granitoides de El Calvario. Se puede ver que el litotipo JANEP-25 (Cuarzodiorita) es afín a las rocas alcalinas (ver Figura 10.8).

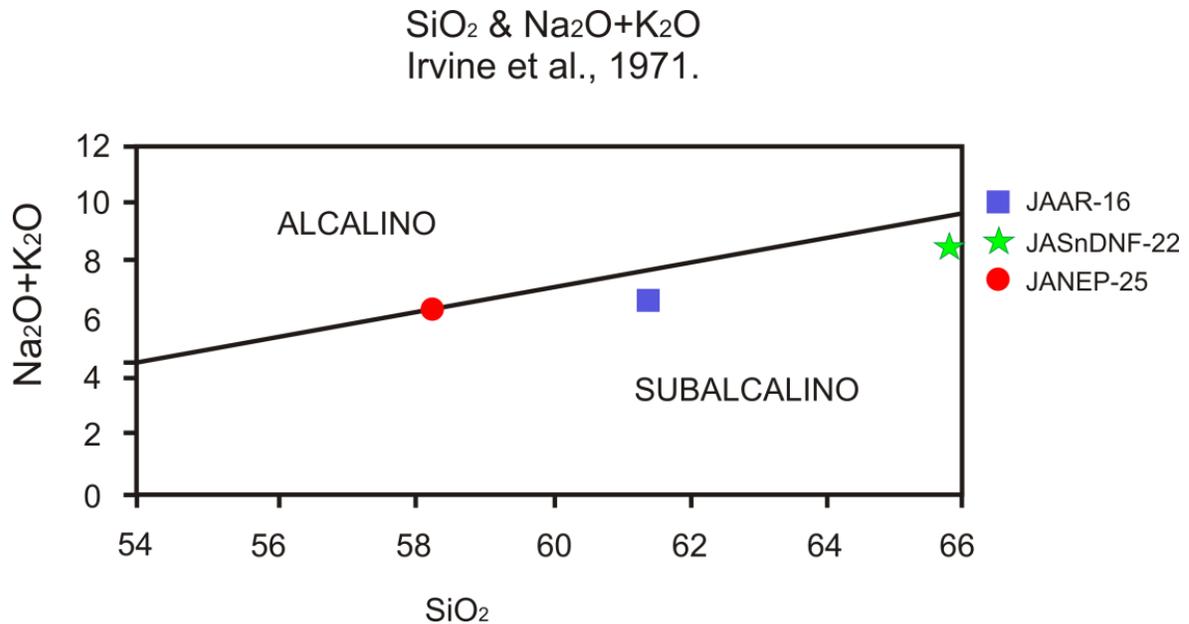
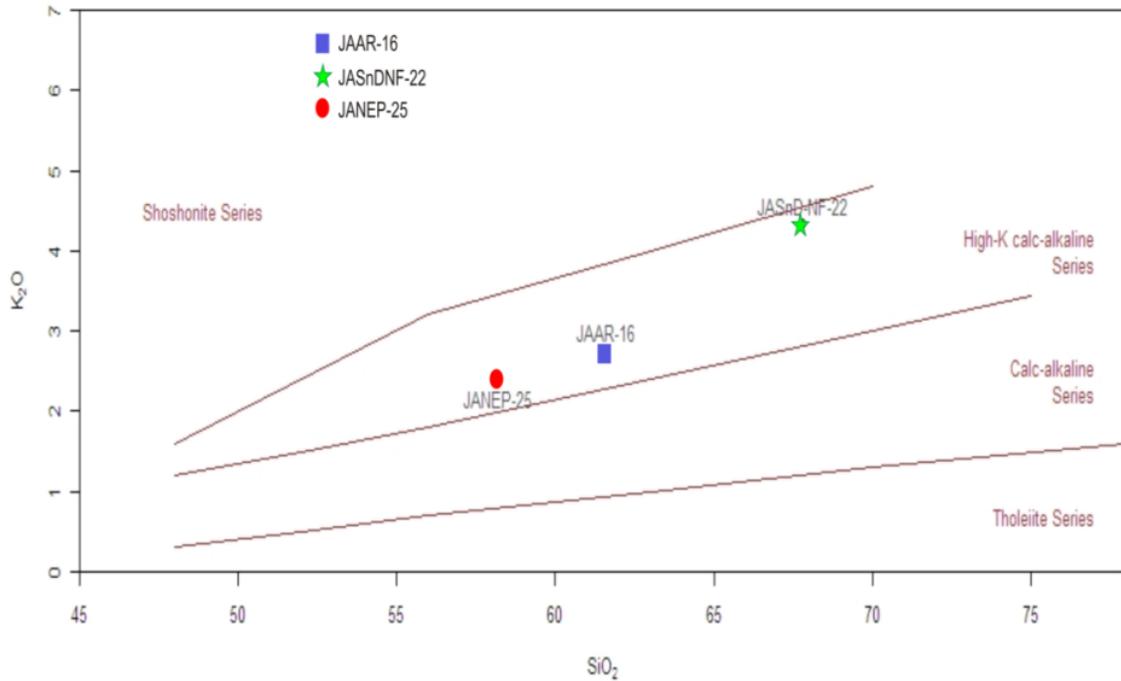


Figura 10.8.- Diagrama de Irvine et al., 1971.

### 10.1.9. Diagrama de Le Maitre

El diagrama de Le Maitre, 1989 es considerado como un clásico de las series magmáticas y lleva ventaja sobre el diagrama de Irvine, 1971, ya que es mucho más discriminatorio. Aquí se puede ver que la mayoría de los litotipos intrusivos de El Calvario pertenecen a la serie calcoalcalina rica en potasio (ver Figura 10.9).

SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O Le Maitre, 1989.

**Figura 10.9.-** Diagrama de Le Maitre, 1989.

## 10.2. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA DE LOS GRANITOIDES DE EL CALVARIO

El único estudio sobre geoquímica de elementos traza en el municipio de Jacala de Ledesma y sus alrededores cita a Flores-Castro, 2001, en el cual se estudian los granitoides de La Encarnación.

Para efectuar esta investigación se seleccionaron muestras que contaran con una representatividad de cada uno de los litotipos graníticos resultado de la clasificación modal y la geoquímica de elementos mayores efectuados previamente. Se aseguró que las muestras seleccionadas no se encontraran con la presencia de minerales secundarios que mostraran la presencia de alteraciones y se procedió a prepararse para fluorescencia de rayos X, cuyos resultados se presentan en el Anexo B.

## 10.2.1. Diagramas Tectonomagmáticos con Elementos Traza

### 10.2.1.1. Diagrama de Harris

Este diagrama de elementos traza muestra el ambiente tectónico en el cual se desarrolló el litotipo JANEP-25, y se obtiene como resultado que este es derivado de una fusión intraplaca (ver Figura 10.10).

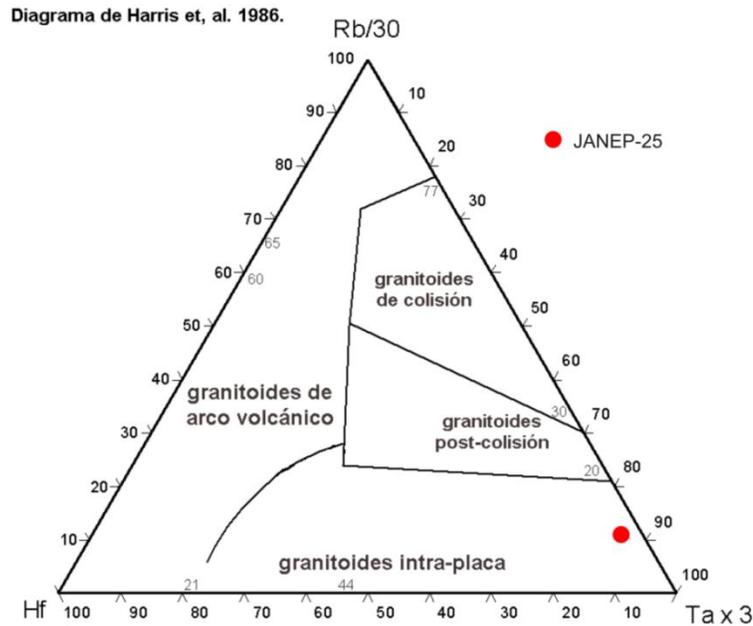


Figura 10.10.- Diagrama de Harris, 1986.

### 10.2.1.2. Diagramas de Pearce

De acuerdo a la nomenclatura establecida por Pearce et al., 1984. Los granitoides de El Calvario son principalmente relacionados con arco volcánico y un litotipo con intraplaca. Ver Figuras 10.11 y 10.12.

VAG = Granitoides de Arco Volcánico  
 WPG = Granitoides Intraplaca  
 Syn-COLG = Granitoides sin-colisionales

**(Y + Nb) & Rb**  
 Pearce et al., 1984.

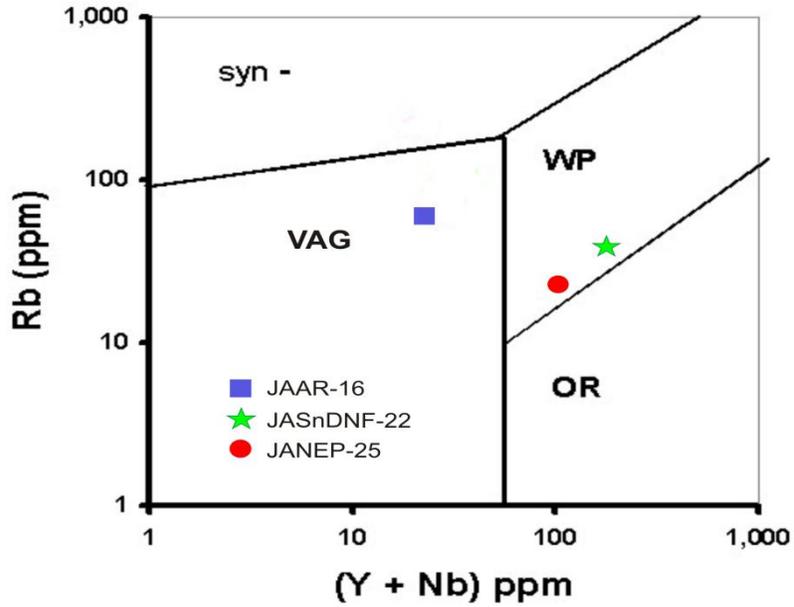


Figura 10.11.- Diagrama (Y + Nb) & Rb de Pearce et al., 1984.

ORG = Granitoides de Dorsal Oceánica  
 VAG = Granitoides de Arco Volcánico  
 WPG = Granitoides Intraplaca  
 Syn-COLG = Granitoides sin-colisionales

**Y & Nb**  
 Pearce et al., 1984.

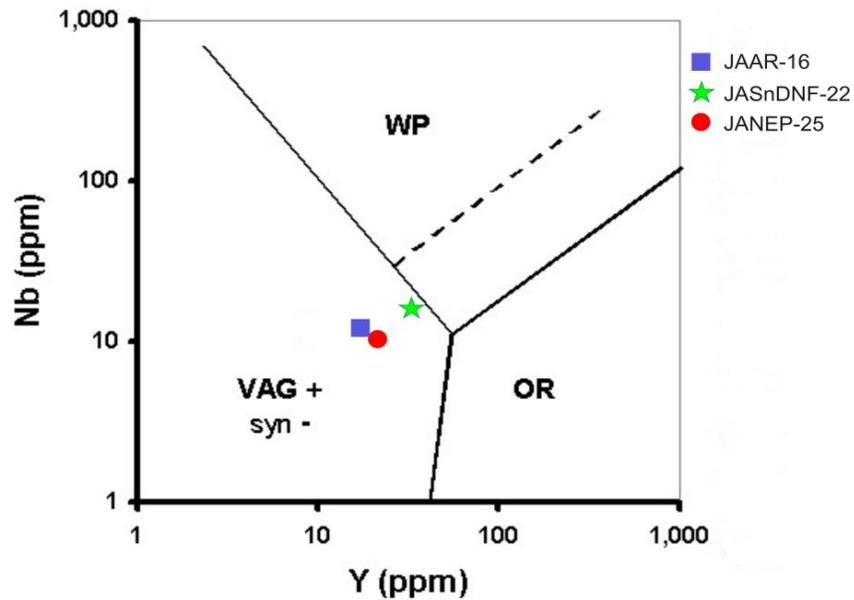


Figura 10.12.- Diagrama Y & Nb de Pearce et al., 1984.

### **10.3. PROSPECCION GEOQUIMICA**

La prospección geoquímica es una parte de la geoquímica aplicada que tiene por objeto la localización y estudio de las anomalías geoquímicas que indiquen la presencia de minerales, agua, hidrocarburos, contaminantes, etc.

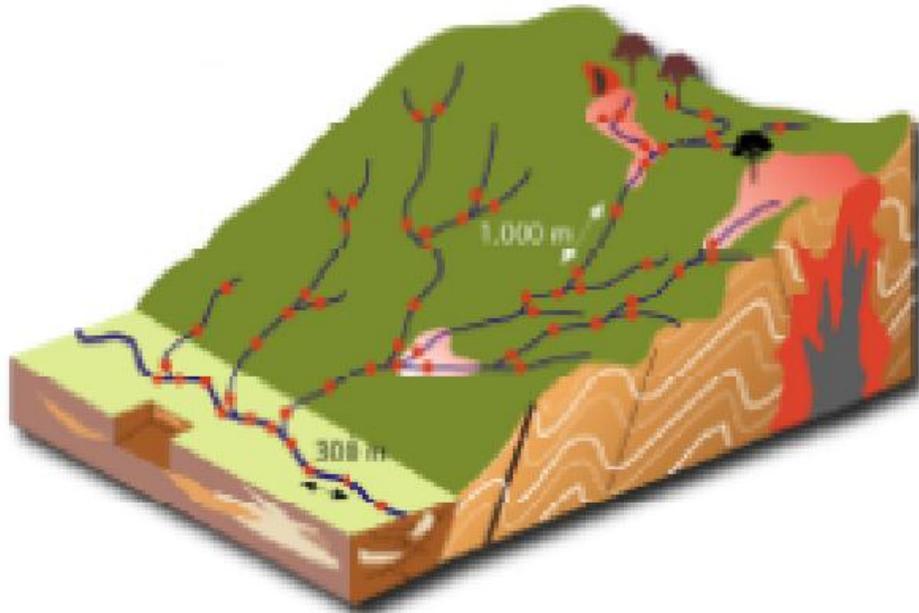
En función de la escala de análisis, los elementos químicos presentaran comportamientos distintos. Estas escalas son las bases de la prospección geoquímica y tienen su fundamento en los principios de la geoquímica.

Estos principios indican que las anomalías geoquímicas en la corteza terrestre, originados por elementos químicos, deben su origen a un efecto concentrador derivado de la extracción de estos elementos de sus fuentes primarias (Atkinson, 1997).

#### **10.3.1. Sedimentos en redes de drenaje**

Este método es el más usado en cualquier campaña de prospección geoquímica a nivel estratégico. Su principio se basa en la respuesta geoquímica de los elementos como estadio final de su evolución dentro del ciclo geoquímico representado en las esferas y el paisaje geoquímico (Viladevall, 2005).

Los elementos resistentes, desarrollados en los ambientes primarios, así como los elementos lixiviados a partir de este ambiente pero desarrollados en ambientes secundarios, se darán cita en los ambientes secundarios en forma de aureolas de dispersión secundaria. Los elementos químicamente resistentes en forma de elementos metálicos, óxidos o sulfatos se depositarán y se acumularán en función de su equivalencia hidráulica en torrentes y ríos (Villadevall, 2005), igual que por su capacidad de ser absorbidos o por su producto de solubilidad los otros elementos que no cumplan la primera condición. Todo ello en función de la dinámica fluvial dará lugar a las ya denominadas aureolas de dispersión secundaria (ver Figura 10.13).



**Figura 10.13.-** Esquema representativo de muestreo en redes de drenaje (Puntos rojos = Puntos muestreados).

### Principales ventajas del método

- 1) Facilidad y simplicidad en el muestreo teniendo siempre en cuenta las áreas de mayor acumulación de elementos pesados tales como "point bars".
- 2) Rapidez de análisis, con un tratamiento previo poco engorroso. Permite un análisis multi-elemento con técnicas de bajo coste.
- 3) La elevada acumulación de elementos en los puntos idóneos principalmente en sectores de relieve acusado, permiten trabajar con límites de detección analítica elevados así como en técnicas semi-cuantitativas y cualitativas con un bajo número de muestras.
- 4) Una subdivisión de la muestra permite su reconocimiento químico y mineralométrico.
- 5) Las dispersiones, permiten fácilmente la localización aguas arriba de los valores anómalos correspondientes al área fuente.

6) A nivel macroscópico, es el que ofrece mejor información geoquímica a nivel regional.

### **Principales Inconvenientes del método**

1) Dificultad en la interpretación de ciertas anomalías, especialmente en sectores con recubrimiento glaciar.

2) El método no es aconsejable en áreas muy llanas pantanosas por la posibilidad de absorción de elementos por óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso que desvirtúan los fondos y umbrales de anomalías.

### **10.3.2. Geoestadística de los sedimentos de arroyo**

El estudio de fenómenos con correlación espacial, por medio de métodos geoestadísticos, surgió a partir de los años sesenta, especialmente con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados. Como antecedentes suelen citarse trabajos de Sichel, 1947; 1949 y Krige, 1951. El geólogo G. Krige propuso una variante del método de medias móviles, el cual puede considerarse como el equivalente al krigado simple que es uno de los métodos de estimación lineal en el espacio con mayores cualidades teóricas. En los años sucesivos la teoría se fue depurando, ampliando su campo de validez y reduciendo las hipótesis necesarias (Samper y Carrera, 1990). De la minería las técnicas geoestadísticas, se han "exportado" a muchos otros campos como hidrología, física del suelo, ciencias de la tierra y más recientemente al monitoreo ambiental y al procesamiento de imágenes de satélite.

Aunque la aplicación de la herramienta geoestadística es bastante reciente, son innumerables los ejemplos en los que se ha utilizado esta técnica en estudios ambientales con el ánimo de predecir fenómenos espaciales (Robertson, 1987; Cressie y Majure, 1995; Diggle *et al.*, 1995). La columna vertebral del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de autocorrelación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como kriging y cokriging. Otros temas importantes dentro del estudio de información georreferenciada son, el diseño de redes de muestreo (McBratney *et al.*, 1981), la geoestadística multivariada (Wackernagel, 1995) y la simulación (Deutsh y Journal, 1992).

A continuación se presenta la Tabla 10.1 con algunos de los datos estadísticos que se lograron determinar para Au con los datos obtenidos (ver Anexo B):

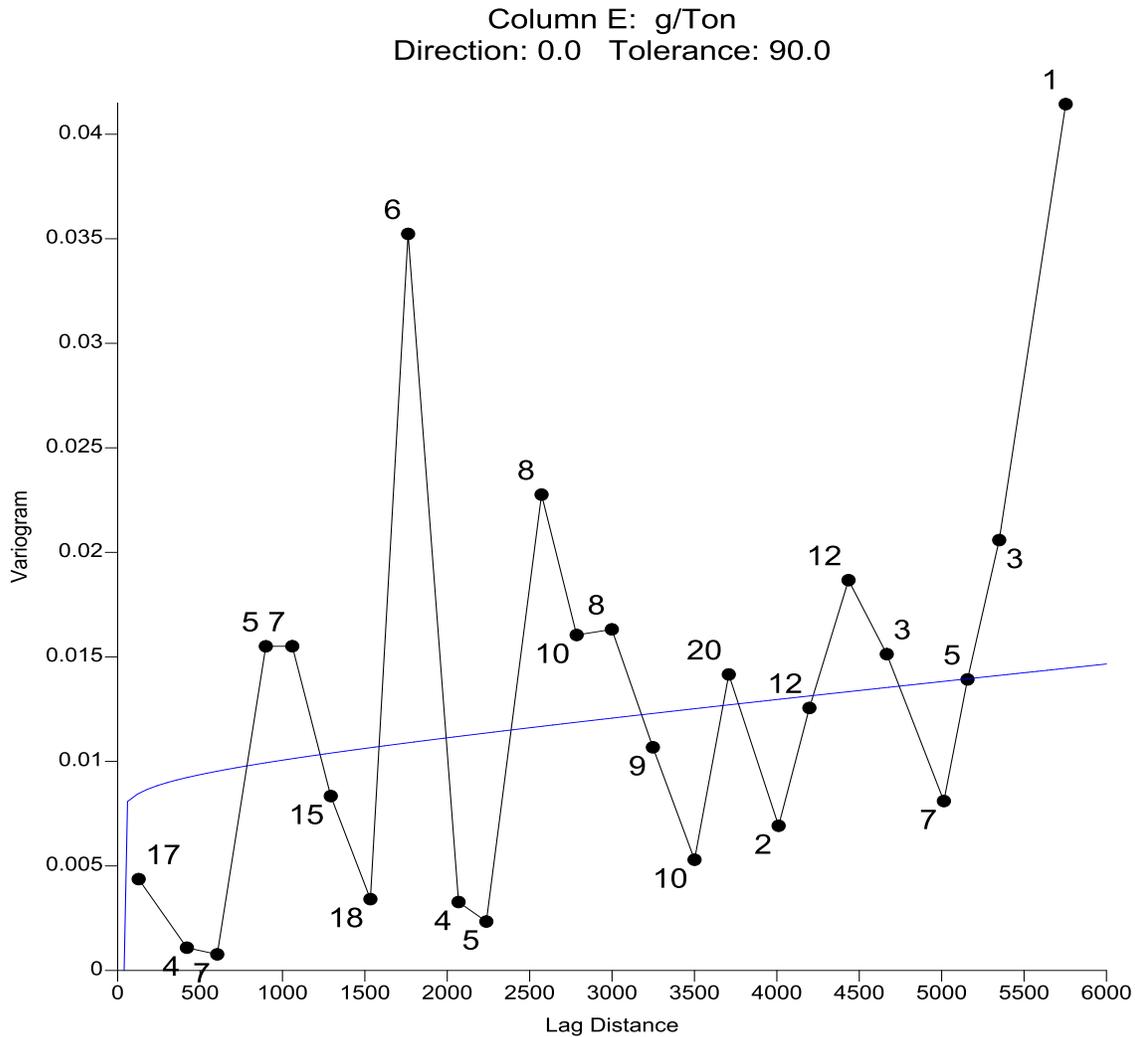
**Tabla 10.1.-** Medidas de dispersión.

Cantidad total de datos	24
Media	0.182125
Desviación estándar	0.160633342
Mínimo	0.025
Máximo	0.483
Varianza:	0.025803071
Coficiente de variación	0.881995016
Rango	0.458
Mediana	0.115
Moda	0.118
Media geométrica	0.122174096
Media armónica	0.083156182
Simetría	0.90788
Curtosis	-0.85461
2da desviación estándar	0.32127
3era desviación estándar	0.4819

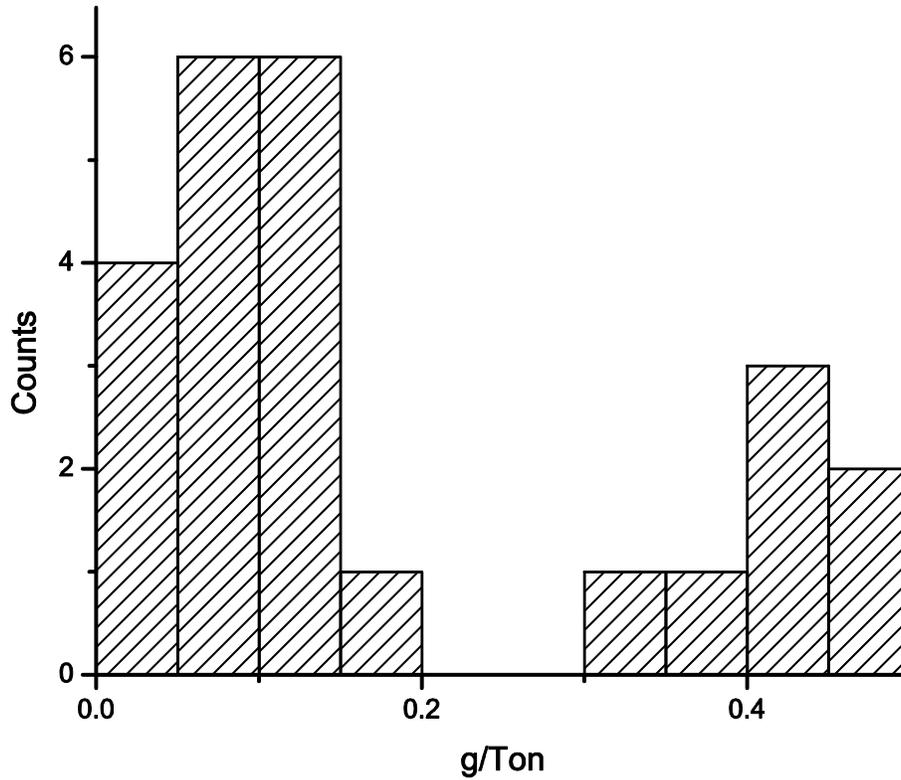
Los valores obtenidos de las medidas de tendencia central y de dispersión (Tabla 10.1) muestran que la población presenta una distribución normal. Ya que para una distribución normal, el valor de simetría debe ser igual a cero o con una tendencia a cero; por otra parte el valor negativo de la curtosis reafirma la distribución normal con tendencia lineal para cada población.

Se obtuvo un histograma con los límites de clase y las frecuencias de los datos obtenidos en el análisis por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) que nos muestra la variabilidad de las concentraciones de Au, lo que valida que el método de muestreo seleccionado corresponde con la hipótesis previa al muestreo, en el cual los valores menores corresponden a las zonas más distales de los intrusivos, skarns y rocas encajonantes y en

medida que las muestras son más cercanas a tales cuerpos los valores de Au se incrementan, además de que este nos indica que no se tiene mezcla de poblaciones lo cual sugiere que los valores menores a 0.25 ppm son de muestras relacionadas a los granitoides mientras que los valores superiores al promedio en la corteza (0.25 ppm) son de las muestras tomadas cerca de los cuerpos de *skarns*, ver Figura 10.15.



**Figura 10.14.-** Datos de dispersión de valores de Au respecto a la distancia de este a oeste en la zona de estudio (distancia en metros).



**Figura 10.15.-** Histograma de los contenidos de Au en los sedimentos de arroyo.

Por otra parte, Sinclair, 1981 determino tres fórmulas para inferir la anomalía posible, probable y cierta mediante la utilización de la media y la desviación estándar; a continuación se enlistan las formulas con el valor de las anomalías para cada una de las dos poblaciones de las muestras obtenidas en los patrones de drenaje con influencia del intrusivo El Calvario:

$$\begin{aligned}
 \text{Fondo} &= \bar{x} \\
 \text{Anomalía Posible} &= \bar{x} + \sigma \\
 \text{Anomalía Probable} &= \bar{x} + 2\sigma \\
 \text{Anomalía Cierta} &= \bar{x} + 3\sigma
 \end{aligned}$$

Se obtuvo para la población 1:

$$\text{Anomalía Posible: } 0.08618 - 0.04642 = 0.03976$$

$$\text{Anomalía Probable: } 0.08618 - 2(0.04642) = -0.00666$$

$$\text{Anomalía Cierta: } 0.08618 - 3(0.04642) = -0.05308$$

$$\text{Anomalía Posible: } 0.08618 + 0.04642 = 0.1326$$

$$\text{Anomalía Probable: } 0.08618 + 2(0.04642) = 0.17902$$

$$\text{Anomalía Cierta: } 0.08618 + 3(0.04642) = 0.22544$$

Se obtuvo para la población 2:

$$\text{Anomalía Posible: } 0.41514 - 0.06111 = 0.35403$$

$$\text{Anomalía Probable: } 0.41514 - 2(0.06111) = 0.29292$$

$$\text{Anomalía Cierta: } 0.41514 - 3(0.06111) = 0.23181$$

$$\text{Anomalía Posible: } 0.41514 + 0.06111 = 0.47625$$

$$\text{Anomalía Probable: } 0.41514 + 2(0.06111) = 0.53736$$

$$\text{Anomalía Cierta: } 0.41514 + 3(0.06111) = 0.59847$$

### 10.3.3. Mapa geoquímico

El método más utilizado para elaborar mapas geoquímicos es el kriging, que encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción.

Los métodos kriging se aplican con frecuencia con el propósito de predicción, sin embargo estas metodologías tienen diversas aplicaciones, dentro de las cuales se destacan la simulación y el diseño de redes óptimas de muestreo.

Una vez se ha hecho la predicción en un conjunto de puntos diferentes de los muestrales vía kriging, se debe elaborar un mapa que dé una representación global del comportamiento de la variable de interés en la zona estudiada. Los más empleados son los mapas de contornos, los mapas de residuos y los gráficos tridimensionales. En el caso de los mapas de contornos, en primer lugar se divide el área de estudio en un enmallado y se hace la predicción en cada uno de los nodos de éste mismo. Posteriormente se unen los valores predichos con igual valor, generando así las líneas de contorno (isolíneas de distribución). Este gráfico permite identificar la magnitud de la variable en toda el área de estudio.

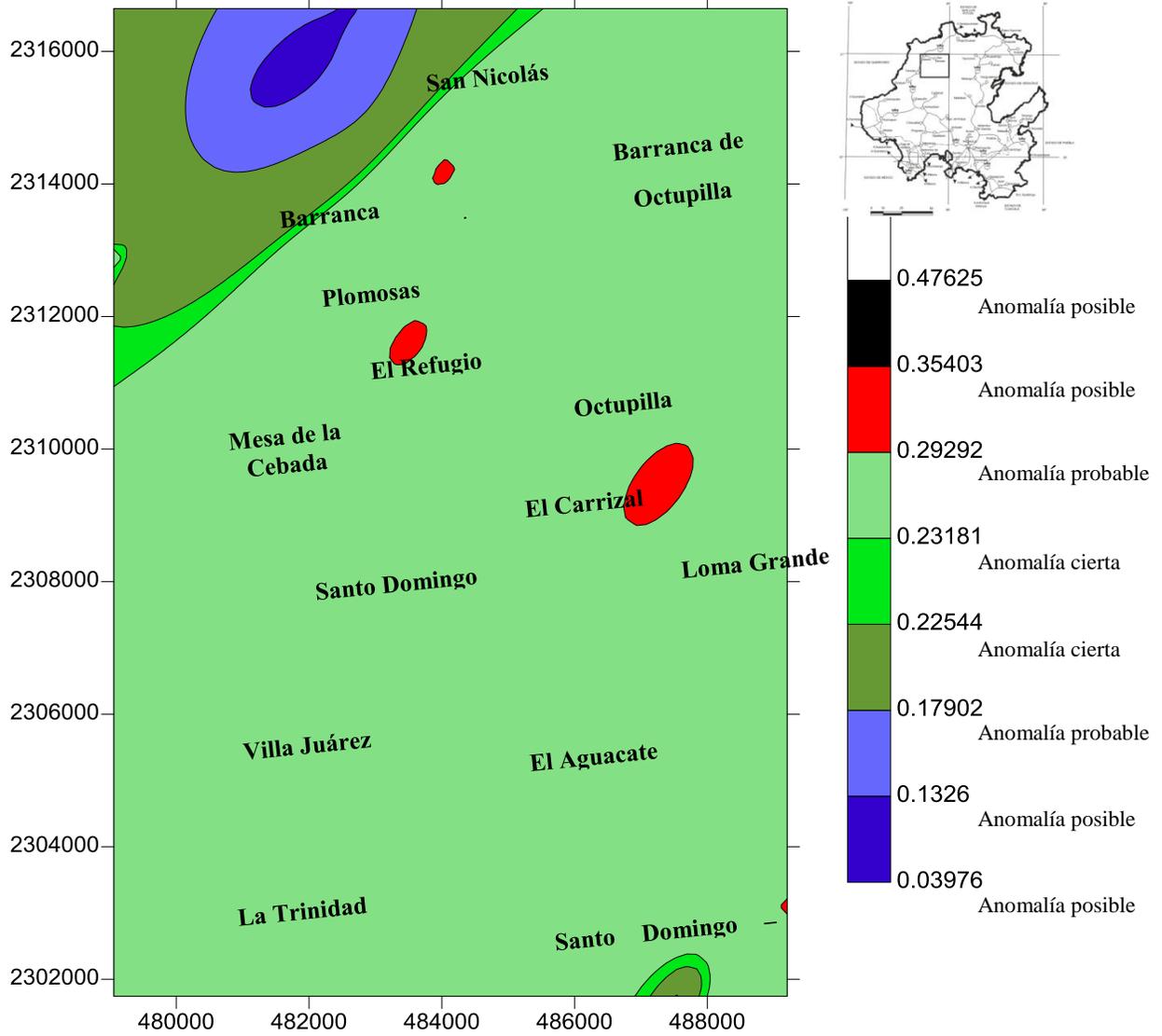
En la Figura 10.15 se muestra la distribución del Au solo tomando en cuenta los valores obtenidos mediante las fórmulas de anomalía posible, probable y cierta, dándonos como resultado los puntos de mayor concentración y una distribución uniforme de los valores que se encuentran ligeramente por encima de la media.

En la Figura 10.16 se representa la distribución y concentración de oro determinado a partir de los sedimentos en redes de drenaje. Los tonos rojos representan las mayores concentraciones de este metal, mientras que de color amarillo, verde, y azul respectivamente disminuyen los valores de oro.

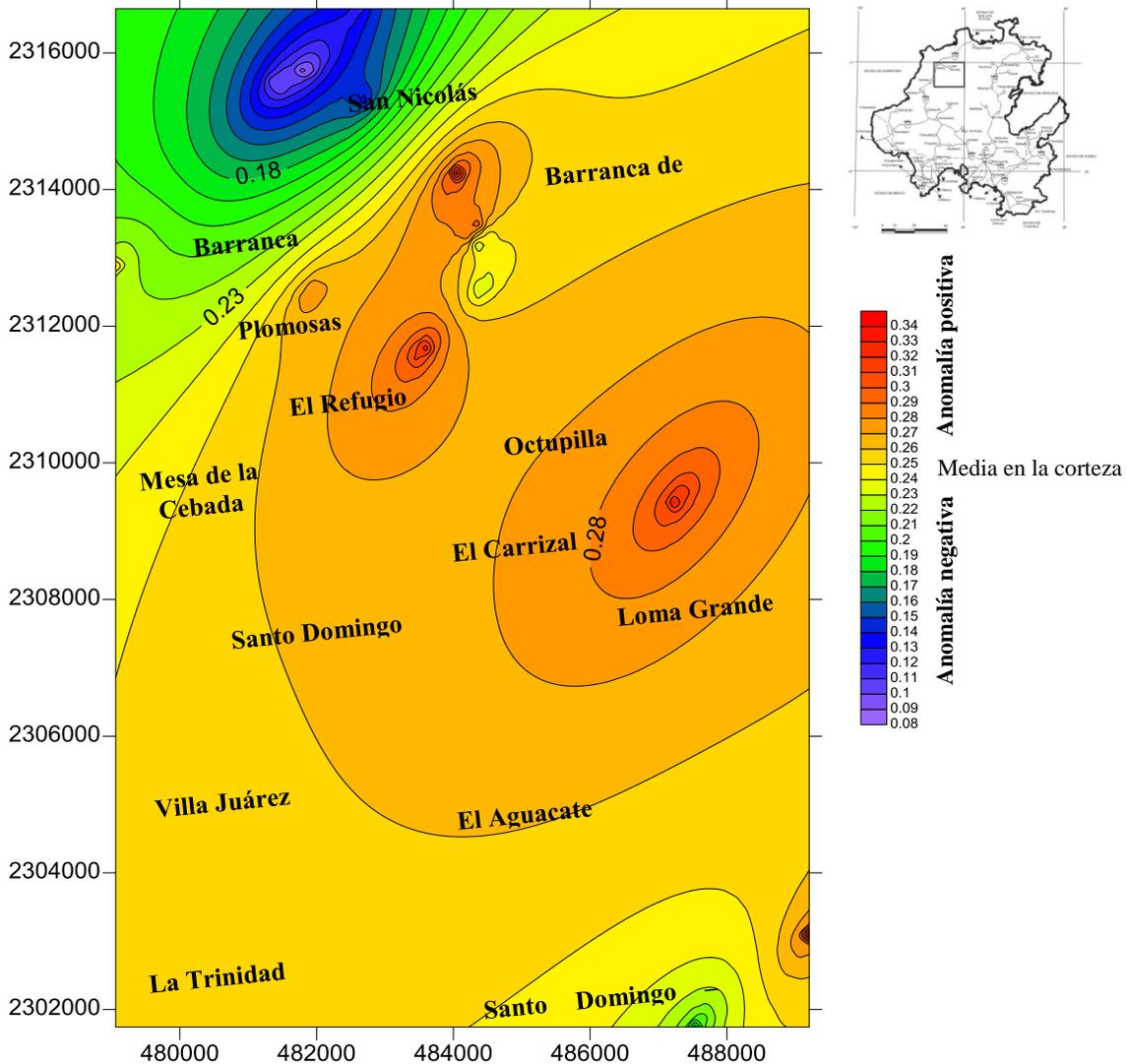
La experiencia ha demostrado que además de la geología, es conveniente sobreponer la configuración topográfica en el mapa geoquímico, para obtener una mejor interpretación. (ver Figura 10.17)

Se realizó un mapa geoquímico de concentración de Au en 3D para tener una mejor visualización de las zonas con una mayor concentración.

Cabe hacer mención que el valor medio de Au en la corteza terrestre es de 5 ppb, lo que en gramos por tonelada representaría 0.25, este es el valor que se tomó como base para determinar las zonas con anomalía geoquímica. Además se menciona la falta de muestreo en la zona noroeste, por ello es que aparecen valores cercanos a cero (colores azules).

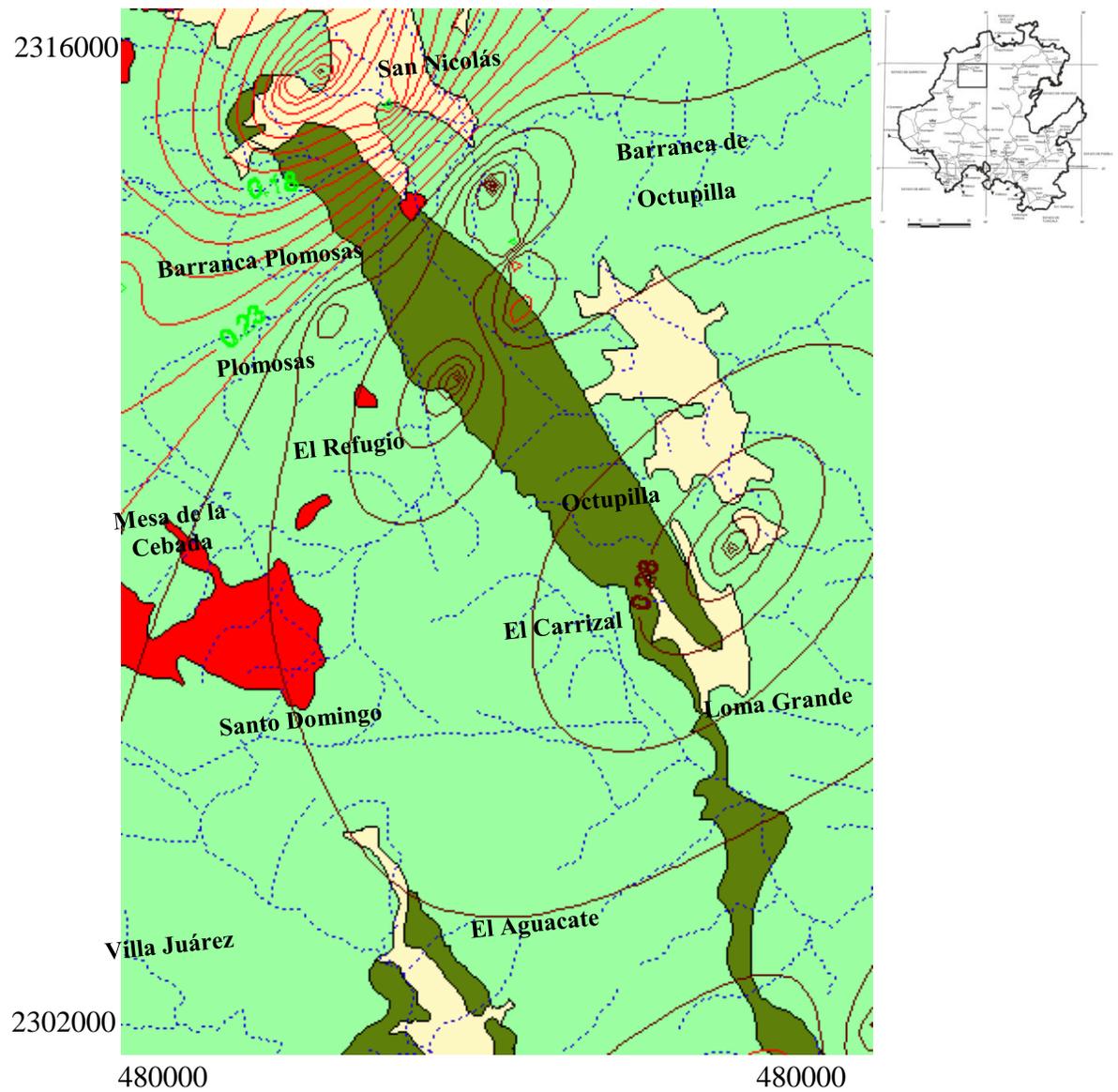


**Figura 10.16.-** Mapa de distribuciones de Au en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa Surfer 9.0, utilizando los valores de anomalía posible, probable y cierta.

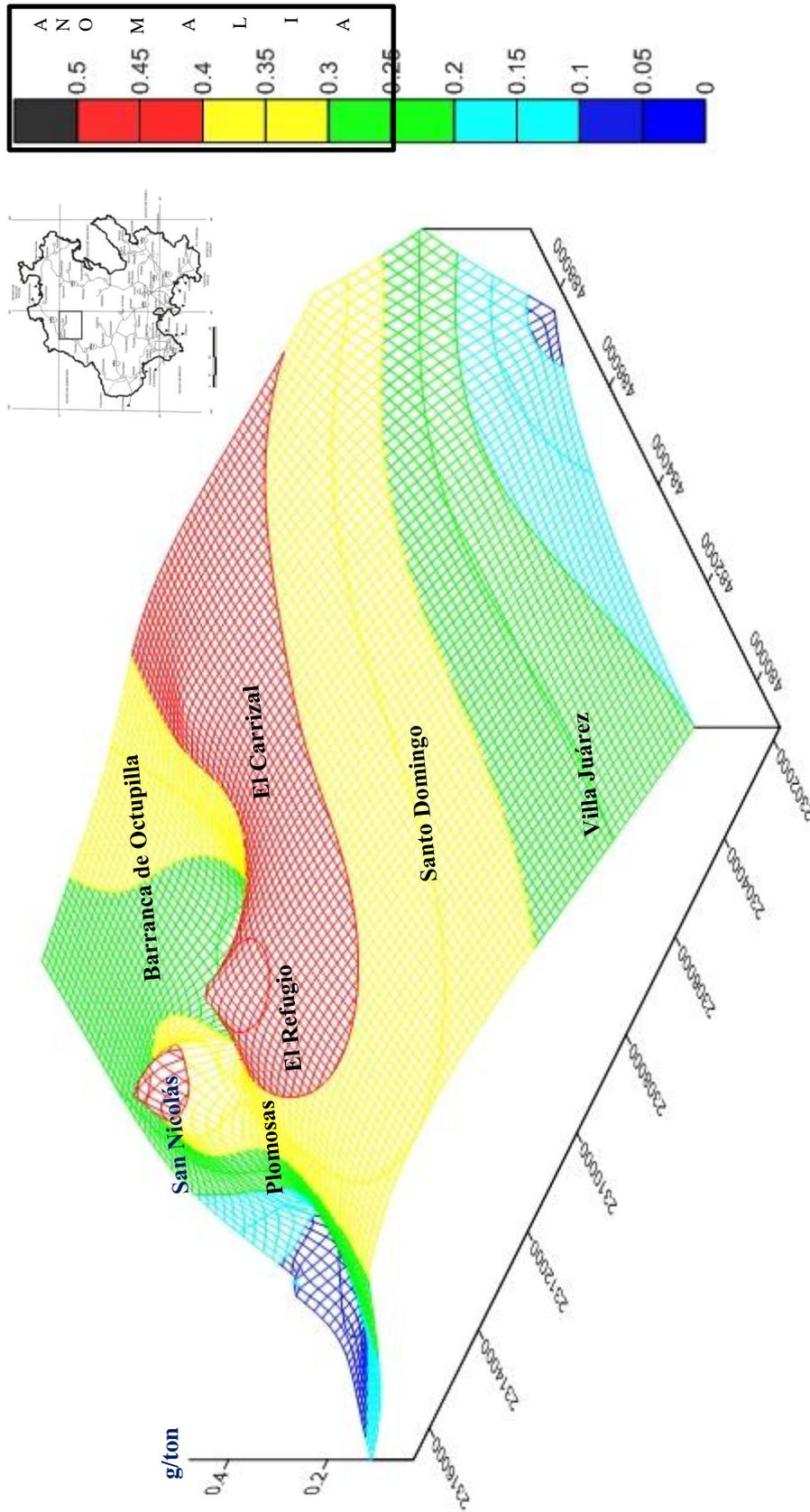


**Figura 10.16.-** Mapa de distribuciones de Au en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa Surfer 9.0.

La concentración y dispersión del Au en sedimentos de arroyo para el área de estudio está dada por el patrón de drenaje, el Au se distribuye a partir del parte aguas localizado en las cercanías de la Mina Nuevo Encino Prieto y lleva dichos sedimentos hasta zonas más bajas donde se concentra este elemento.



**Figura 10.17.-** Mapa de distribuciones de Au (líneas negras), geología y escurrimientos superficiales en el área de estudio obtenido mediante kriging en el programa ArcGis 9.3.



**Figura 10.18.-** Mapa 3D de distribuciones de Au obtenido en el programa Surfer 9.0 con base en el kriging que se realizó para el mapa de contornos, (Figura 10.16).

# 11. GEOLOGÍA ECONÓMICA

## 11. GEOLOGÍA ECONÓMICA

### Cantidades litósfericas de oro

La abundancia de oro en la litósfera es de aproximadamente 5 ppb como media, según la mayoría de los autores, que también coinciden que se encuentran más enriquecidas las rocas maficas que las félsicas, aunque se mantiene que las diferencias son relativas.

En cuanto a su comportamiento durante la diferenciación el Au se enriquece junto con el K, lo que explica que en los estadios postmagmáticos con elevada potasificación den lugar a algunos yacimientos auríferos. Boyle, 1979 menciona la correlación del Au con el Fe, Cu, Ag, S, As y Sb.

Iverson et al., 1974 observa que el contenido en Au aumenta con la basicidad de la roca pero también con el contenido en Na; que su concentración en las rocas ígneas no se encuentre relacionado con el contenido de sus encajantes sedimentarios o ígneos y que pueden existir ciertos procesos en la diferenciación magmática capaces de generar soluciones hidrotermales que transporten el Au de la cámara magmática a su lugar de acumulación.

Grabazev et al., 1986 nos indica que el contenido medio de Au, es de 1 a 2 ppb en las intrusiones mesoabisales de una asociación granítica, mientras que los post-orogénicos hipoabisales y leucocráticos, poseen contenidos entre 2 y 3 ppb. Esta observación contradice los clarkes propuestos por Boyle, 1979. Según estos autores se ha observado la correlación positiva Fe/Au y Mg/Au lo que reafirma su condición de siderófilo. Por otra parte, Grabazev et al., 1986 nos indica que los granitos afectados por un metasomatismo, presentan contenidos entre 2 y 4 ppb, en casos aislados hasta los 6 y 9 ppb, lo que considera para éstos, que el Au no se distribuya uniformemente ya que también se asocia con los sulfuros. Este autor, observa además una disminución del contenido en Au en los granitos tardíos y post-orogénicos mientras que en las tonalitas-granodioritas orogénicas, dicho fenómeno no ocurre. La discusión se centra en la evolución de este metal en la cámara magmática. En efecto, si el líquido cristaliza completamente y la fase acuosa no reacciona con la roca cristalizada a la temperatura del sub-sólidos, entre el 50-70% del Au del magma inicial entra en la fase fluida (principalmente clorurada).

Este fenómeno dará lugar a un cambio considerable del coeficiente de partición entre el fluido y el magma, pero a favor de la fase fluida, lo que explicaría el porqué de las acumulaciones de Au en las partes apicales de las intrusiones. Si el fluido desaparece rápidamente, persistirán los contenidos normales en los granitoides y si éste reacciona con el granito, la temperatura descenderá y el Au se depositará al disminuir su solubilidad al incrementarse la actividad del azufre. Esto explicaría los elevados contenidos de oro, de los granitos alterados hidrotermalmente, frente a los granitos inalterados.

En las rocas metamórficas el Au se encuentra en los mismos minerales que en las rocas ígneas y sedimentarias: pirita, arsenopirita, pirrotina, magnetita, biotita, piroxenos y anfíboles y de forma nativa.

Si bien como ya hemos indicado el Au no es un calcófilo, tiende a concentrarse en su migración junto a los sulfuros de As y Sb principalmente, pero también acompaña al K, Na, Mo, W, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, Se, Te y Bi.

El oro se puede alea con los otros metales para darle características especiales. En su forma pura, tiene un lustre metálico y es de color amarillo, pero cuando es mezclado o aleado con otros metales, tales como plata, cobre, zinc, el níquel, el platino, el paladio, el telurio, y el hierro, crea las varias tonalidades del color que se extienden de plata-blanco a verde y a naranja-rojo.

Generalmente, los tonos del rojo, amarillos y verdes son hechos agregando cantidades que varían de cobre y de la plata para producir las aleaciones de 10 a 14 quilates. Los tonos blancos han sido hechos tradicionalmente aleando níquel, zinc y cobre con este mineral, pero más recientemente la plata y el paladio han substituido el zinc. Estos tratamientos de variaciones de color se utilizan sobre todo en joyería.

La fineza del oro es un término metalúrgico que indica la pureza del oro y se expresa en partes por 1.000. Las monedas y las barras de oro tienen una fineza de 999,9 porciones por 1.000. La pureza en un artículo o la cantidad de oro en una aleación, se mide con una unidad llamada un quilate. Un artículo fino o puro es de 24 quilates. En el de pocos quilates se

valora el indicar el contenido de la proporción como fracción de 24. Por ejemplo, un artículo de 18 quilates contiene  $18/24$  (o  $3/4$ ) oro fino y  $6/24$  (o  $1/4$ ) de aleación en peso.

### **Usos y características del Oro**

La alta conductividad eléctrica del oro lo hace un conductor excelente y confiable, particularmente en los ambientes ásperos, donde las temperaturas pueden extenderse de  $55^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . El uso en trazado de circuitos asegura la confiabilidad de la operación del equipo, particularmente en la activación vital de los mecanismos de la bolsa de aire de seguridad en vehículos de motor o el despliegue de satélites o de las naves espaciales.

No hay otro metal tan dúctil o tan maleable como el oro. Una sola onza de metal de oro se puede estirar en un alambre cinco millas de largo. Se puede martillar en hojas tan delgadas que la luz puede pasar a través de ella.

En una pureza elevada refleja la energía infrarroja (del calor) casi totalmente, haciéndola ideal para la reflexión del calor y de la radiación.

El oro es también un conductor excelente de la energía termal. Se utiliza en muchos procesos electrónicos para disipar calor lejos de los instrumentos delicados. Por ejemplo, el inyector principal del motor de la lanzadera de espacio utiliza una aleación de oro del 35%.

Los edificios significativos, los templos y las estatuas religiosas se han cubierto con finas hojas. Debido a su importancia siempre se ha considerado un símbolo de la abundancia y de la energía de su poseedor.

La joyería de oro es universal y popular, amada por su color amarillo brillante. En muchos países asiáticos, tales como India, Tailandia, y China, es importante para las ceremonias religiosas y las ocasiones sociales, tales como el Año Nuevo chino y las uniones hindúes.

Todavía hoy se le considera almacén del valor financiero, particularmente en muchos países en vías de desarrollo. Sin embargo tiene muchas otras aplicaciones vitales en la vida moderna.

Cada año aproximadamente 660 toneladas se utilizan en telecomunicaciones, tecnología de información, tratamientos médicos, y varios usos industriales. Se utiliza en la fabricación de aproximadamente 50 millones de computadoras cada año, así como millones de televisiones, de DVDs, de VCRs, de cámaras de vídeo y de teléfonos móviles.

El oro también ha significado un aporte y beneficio para la medicina, desde el 1500 A.C por creerse que tenía múltiples propiedades terapéuticas. Los alquimistas, por ejemplo, lo recetaban por creer que prolongaba la vida y aliviaba las dolencias. Más tarde y hasta hace algunos años este metal se utilizó en la medicina dental para rellenar los huecos de las caries y para fabricar implantes dentales.

Posteriormente, en 1927 se comenzó a explorar los beneficios del oro en tratamientos para la artritis reumatoide, lo que hoy se conoce como la Crisoterapia. La investigación sobre los pacientes con artritis que usaron sales de oro como tratamiento arrojó muy buenos resultados: actuando como eficaz antiinflamatorio y aliviando las dolencias propias de esta enfermedad, es por esto que hoy muchos expertos consideran el oro para agregarlo entre las drogas más eficaces para reducir la inflamación, el dolor y la falta de flexibilidad en las articulaciones.

Con posterioridad también se utilizó este tipo de terapias a base de sales de oro se ha utilizado en tratamientos paliativos del asma, lepra, sífilis y tuberculosis, además de presentar efectos favorables en enfermedades a la piel, como el lupus discorde.

También se han estudiado los beneficios del oro en tratamientos contra el cáncer. En una primera etapa se usó para detectar y tratar el cáncer a la próstata con muy buenos resultados. Los pacientes que fueron tratados con la Crisoterapia o sales de oro mostraron un estancamiento de la enfermedad. Además en otros usos relacionados con el cáncer - usando pequeños aumentos de oro (del tamaño de un grano del arroz), los doctores pueden identificar exactamente la posición de la próstata del paciente durante el tratamiento. La exactitud mejorada permite una dosis de radiación más exacta y un área puntual para el tratamiento del tumor.

Las propiedades inmejorables del oro hacen que el organismo lo absorba rápidamente, lo retenga por período prolongados y lo elimine fácilmente. Lo mejor de todo es que no es tóxico para el organismo. Hoy se investiga el oro como una fuente radiactiva en los tratamientos contra varios tipos distintos de cáncer. De hecho investigadores de la Universidad de California y del Instituto de tecnología de Georgia encontraron en el oro un gran aliado para matar células cancerígenas, en tratamientos no invasivos contra la enfermedad. Esta conclusión se basó en estudios previos, en los que utilizaban las nanopartículas de oro para detectar el cáncer.

### **Reservas mundiales de oro**

Las reservas mundiales de oro han sido siempre problema, debido a los muchos factores que influyen en su estimación en una u otra dirección. El “Bureau of Mines” de Estados Unidos estima las reservas de oro de Sur África en 500 millones de onzas, o sea 16.430 toneladas métricas; cantidad que representa el 50% de las reservas totales de oro en el mundo.

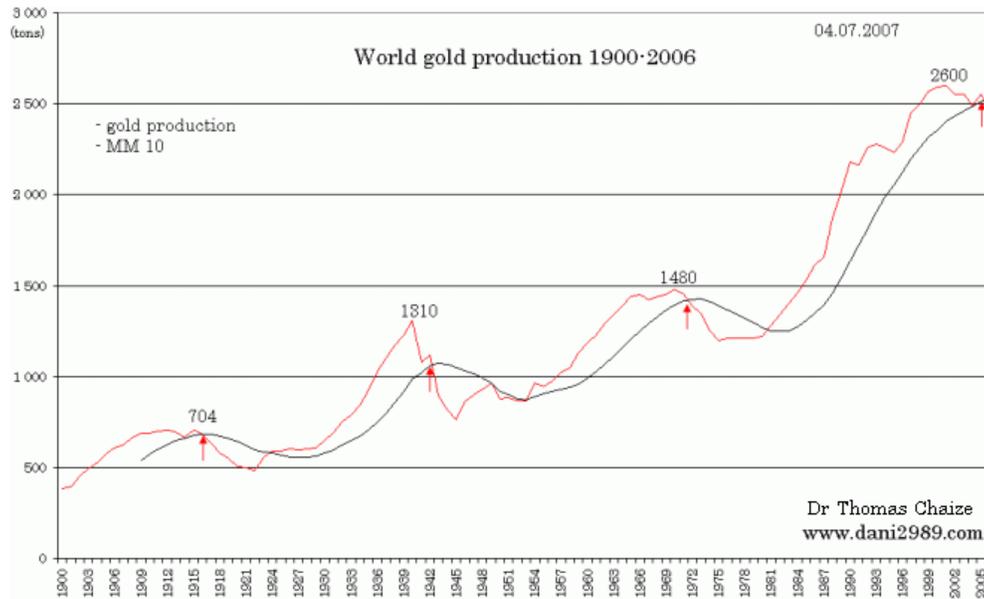
A su vez el “South African Mineral Bureau” ha estimado las reservas de Sur África en 16.500 toneladas métricas o sea en 577 millones de onzas cerca del mismo orden de magnitud que calcula el “Bureau of Mines” de Estados Unidos.

Otros investigadores han estimado las reservas de oro en el mundo en 53.824 toneladas métricas, cuya cantidad el 50 % provendrían de Sur África.

La Comisión del Oro del Congreso de EUA estimaba que las reservas por extraer de Sur África eran de aproximadamente 15.550 toneladas. Las existencias de la ex-URSS se calculaban en un volumen similar. Las existencias de los yacimientos en otros países se estimaban en 60.000 toneladas. En 1984 se consideraba que restaba por extraer alrededor de 91.000 toneladas. De hecho entre 1985 y 2007 se extrajeron 53.000 toneladas por lo que las reservas en yacimientos no superarían en la actualidad las 40.000 toneladas.

El máximo de la producción mundial de oro tuvo lugar en 2001 con 2600 toneladas de oro producido en un año en el mundo. Desde esta fecha, la producción mundial de oro baja ligeramente todos los años mientras que el precio de este metal aumenta con fuerza y

constancia. La subida marca de los precios del oro de \$255 a más de 700 dólares no bastó para mantener la producción de oro a su nivel de 2001 (ver Figura 11.1).



**Figura 11.1.-** Tendencia de la producción de Au de 1900 a 2006.

La subida del precio de la onza de oro tuvo un efecto que estimulaba la producción mundial, ella evitó que la producción de oro bajara brutalmente. Ese principio de reducción de la producción de oro tiene orígenes diferentes que las anteriores olas de reducción del Siglo XX, que tenían orígenes exógenos (1.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup> Guerras Mundiales, política monetaria). Ciertamente, hay una gran inercia entre la reanudación de la exploración y la producción.

Y a la fecha el oro y otros metales mantienen su incremento, por lo cual la exploración y extracción de dicho metal se hace más interesante día con día (ver Figura 11.2, 11.3 y 11.4).



Figura 11.2.- Tendencia del precio de Au por onza el día 22 de marzo de 2011.



Figura 11.3.- Variación del precio del Au por onza en el último año.



**Figura 11.4.-** Variación del precio del Au por onza en los últimos 10 años.

### Ventajas del área de estudio

El área de estudio en conjunto con la alza en el precio de los metales, en especial del oro hace de sumo interés posteriores exploraciones y en dado caso el aprovechamiento de elementos metálicos; a continuación se enlistan las ventajas de incursionar en proyectos de este tipo:

- El incremento del valor del Au, cotización record abril de 2011 “1470 dólares/onza”.
- Accesos a la zona de El Refugio en muy buenas condiciones para todo tipo de vehículos, tanto particulares como para tracto camiones.
- A partir del municipio de Jacala de Ledesma se recorren 10 km hasta la zona de El Refugio, en donde el 50 % del camino es asfaltado y el otro 50 % es de terracería en buen estado hasta llegar al pie de mina.
- Se encuentra una planta de beneficio dentro del estado, en el municipio de Zimapan localizado a unos cuantos kilómetros del municipio de Jacala tomando la Carretera Federal #85 en dirección suroeste.
- En el área de estudio no solo se encuentra mineralización de Au, sino que también se cuantificaron elementos metálicos como Fe, Pb, Zn, Cu y en menor proporción Ag.

# 12. CONCLUSIONES

## 12. CONCLUSIONES

1. Se realizó la cartografía geológica del área de estudio tomando como base el plano topográfico de la hoja San Nicolás F14C59 editada por el INEGI, 1983, además del levantamiento que se realizó durante el trabajo de campo. La cartografía se plasmó en los programas ArcView 3.1, ArcGis 9.3 y Global Mapper; esta quedó representada en el Anexo 3 “Plano geológico”.
2. Como parte de la cartografía geológica se describieron y muestrearon varias litologías tanto ígneas como sedimentarias, las primeras descritas en el capítulo 9 “Petrología Ígnea” y las segundas en el capítulo 6 “Estratigrafía”.
3. En cuanto al trabajo de campo realizado se muestrearon: 3 litotipos graníticos, 1 enclave, 2 vetas, 2 zonas de contacto y 24 muestras de sedimentos de arroyo.
4. Se prepararon dichas muestras geológicas para su análisis, los granitoides, estructuras mineralizadas, rocas del skarn y su encojonante fueron trituradas, pulverizados y tamizados por la malla 100 para ser analizados por FRX; los sedimentos de arroyo se tamizaron, se separaron en la mesa Wilfley (densimetría) en material de mena y material de ganga, el material de mena fue preparado para digestión en medio ácido y medio alcalino.
5. La fluorescencia de rayos X aportó la cuantificación de elementos mayores y traza en las muestras rocosas; la absorción atómica permitió la cuantificación de los valores de Au en las muestras de los sedimentos de arroyo y en las estructuras mineralizadas. Los resultados del análisis se presentan en el Anexo B.
6. Se establecieron diversas clasificaciones, entre las cuales se encuentra la clasificación de Streckeisen en el cual se observa que las rocas plutónicas del área de influencia del intrusivo “El Calvario” tienden a la composición de Cuarzomonzodiorita. Aunque localmente extienden su composición al campo de la granodiorita en su litotipo

más ácido y a los de Monzodiorita y cuarzodiorita como extremos básicos, estando todos ellos cerca del campo de la cuarzomonzodiorita.

7. Mediante el análisis por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) se determinó la concentración de Au en cada muestra; en las muestras de los granitoides la concentración varía de 55 mg/ton a 175 mg/ton, en las vetas hidrotermales la concentración oscila en 1.34 g/ton, en los sedimentos de arroyo las concentraciones van de los 25 mg/ton a los 500 mg/ton y en las muestras de skarn los valores van desde los 65 mg/ton hasta los 4.12 g/ton.

8. Posteriormente a la obtención de las concentraciones de Au en las muestras se realizaron mapas de isoconcentración (ver Mapas geoquímicos en el capítulo 10 “Geoquímica”) para detectar las zonas de anomalía geoquímica, encontrando que la zona más enriquecida en este metal es el área circundante a la mina El Refugio.

# 13. RECOMENDACIONES

## 12. RECOMENDACIONES

Con el desarrollo de esta investigación y con los conocimientos adquiridos acerca de los granitoides del área de estudio así como su potencial aurífero, se recomienda para futuros trabajos:

- Promover a la comunidad de Jacala de Ledesma a la implementación de contratos de exploración y/o explotación que convengan en el desarrollo minero de esta región.
- Planificación de una zona de muestreo mayor, dado que se encontraron reportes de valores de Au y otros elementos de interés económico en lugares aledaños a la zona de estudio.
- Efectuar una campaña de exploración geofísica para la determinación del volumen del yacimiento, así como el modelaje del cuerpo intrusivo “El Calvario”.
- Se recomienda el diseño de un nuevo plan de exploración que incluya barrenación para realizar la cuantificación precisa de las reservas que se tienen en el área; además de estudios de explotación que garanticen la vida útil del yacimiento.

# **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

**Arth, J.G.**, 1976. Behavior of trace elements during magmatic processes –a summary of theoretical models and their applications. J. Res. US Geol. Survey, v. 4, p. 41 – 47.

**Atkinson, W. W. Jr.**, 1997, “Geoquímica de los Depósitos de Oro”, Evidencias Geológicas para modos de transporte y precipitación hidrotermal del oro y aplicaciones a la exploración. Impreso por la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Distrito de Durango. 192 p.

**Bateman, P.C.** y **Chapell, B.W.**, 1979. Crystallization, fractionation and solidification of The Toulumne Intrusive Series, Yosemite National Park, California. Geological Society of America Bulletin, v. 90-part I, p. 465 – 482.

**Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotten, J., Silva, J., Bourdon E. y Eissen, J.P.**, 2001. Mio–Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. Earth and Planetary Science Letters 192 (4): 561-570.

**Bernabé-Martínez, M.G.**, 1994. Microfacies de la Formación Las Trancas en el Anticlinal de Bonanza, Hidalgo, México. Revista de Investigación PANCROMO23, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, v. 1, n. 1, p.50 – 58.

**Bourdon, E., Eissen, J.P., Gutscher, M.A., Monzier, M. Hall, M.L. y Cotton, J.**, 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). Earth and Planetary Science Letters 205(3-4): 123-138.

**Boyle, R.W.**, 1979. The geochemistry of Gold and Its Deposits.. Canada Geological Survey Bull n° 280. 584p.

**Carrillo-Martínez, M.** y **Suter, M.**, 1982. Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro. Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 6, México, D.F., Excursión a la región de Zimapán y áreas circundantes, libro-guía, p. 1 – 20.

**Chapell, B.W.** y **White, A.J.R.**, 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, v. 8, p. 173 – 174.

- Chapell, B.W.** y White, A.J.R., 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. *Journal of Petrology*, v. 28, p. 111 – 138.
- Cocherie A.**, 1978. Gèochimie des terres rares dans les granitoides. Ph. D. Thesis. Rennes University.
- Coogan, A.H.**, 1973. Nuevos rudistas del Albiano y Cenomaniano de México y el sur de Texas. *Rev. Inst. Mex. Petrol.*, v. 5,2, p. 51-83.
- Córdoba-Méndez, D.A.**, 1992. Carta Geológica del Estado de Hidalgo, escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UAEH., 134 p. (inérita).
- Córdoba-Méndez, D.A.**, Lugo-Hubp, M., Roche-Carrascosa, L. y Bertrand-Camargo, C., 1991. Bibliografía geológica preliminar del Estado de Hidalgo. Instituto de Geología, UNAM., Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UAH., 42p. (inérita).
- Cox, K.G.** y Clifford, P., 1982. Correlation coefficient patterns and their interpretation in three basaltic suites. *Contributions to Mineral and Petrology*, v. 79, p. 268 – 278.
- Cressie, N. y Majure, M.M.**, 1995. Non-Point Source Pollution of Surface Waters over a Watershed. Programme Abstracts of the third SPRUCE International Conference. Merida, Mexico.
- De la Roche, H.**, 1964. Sur l'expression graphique des relations entre la composition chimique et la composition minéralogique quantitative des roches cristallines. Presentation d'un diagramme destiné a l'étude chimico-minéralogique de massifs granitiques ou granodioritiques. Application aux Vosges cristallines. *Sci. de la Terre, Fr.*, v. 9, p. 293 – 337.
- De la Roche, H.**, 1972. Revue sommaire de quelques diagrammes chimico-minéralogiques pour l'étude des associations ignées et sédimentaries et de leurs derivés metamorpiques. *Sci. de la Terre, Fr.*, v. 17, p. 31 – 46.
- De la Roche, H.**, 1976. Sur la contribution des donnés chimiques à une systématique générale des roches ignées. En apéndice: "A diagram for a chemical classification of

---

igneous rocks referred to their mineral contents”: Sci. Terre. Nancy, v. 9, n. 3, p. 293 – 337.

**De la Roche, H.**, 1978. La chimie des roches présentée et interprétée d’après la structure des leur faciès minéral dans l’espace des variables chimiques. Fonctions spécifiques et diagrammes qui s’en déduisent. Application aux roches ignées. Chemical Geology, v. 21, p. 63 – 87.

**De la Roche, H.**, 1986. Classification et nomenclature des roches ignées: un essai de restauration de la convergence entre systematique quantitative, typologie d’usage et modelisation génétique. Bull. Soc. Géol., Fr., v. 8, t. II, n. 2, p. 337 – 353.

**De la Roche, H.**, Leterrier, J., GrandClaude, P. y Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses – its relationships and current nomenclature. Chemical Geology, v. 29, p. 183 – 210.

**Debon, F.** y Le Fort, P., 1983. A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. Transactions of the Royal Society of Edimburgh Earth Sciences, v. 73, p. 135 – 149.

**Debon, F.** y Le Fort, P., 1988. A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. Bull. Mineral., v. 111, p. 493 – 510.

**Defant, M.J.** y **Drummond, M.S.**, 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature 347: 662-665.

**Deutsch, C. V. & Journel, A.G.**, 1992. GSLIB: Geostatistical Software Library and User’s Guide. Oxford University Press, New York.

**Diggle, P., Harper, L. y Simon, S.**, (1995). Geostatistical Analysis of Residual Contamination from Nuclear Weapons Testing. Programme Abstracts of the third SPRUCE International Conference. Merida, Mexico.

**Elvir, A. R.**, 1961. Reconocimiento geológico efectuado en el Distrito Minero de Jacala, Estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Naturales No Renovables.

- Flores-Castro, K.**, 2001. Geoquímica y petrología de los granitoides de la región noroccidental del Estado de Hidalgo, México. Universidad de Barcelona, Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Tesis doctoral. 400 p. (inédita).
- Flores-Castro, K., Ramírez-Cardona, M., Ortiz-Hernández, L.E., Canet-Miquel, C., Roy, P.D., Cadena- Zamudio, J.L.**, 2006. Paragénesis de minerales de Te-Ag-Bi-Au en la mina Nuevo Encino Prieto, Jacala de Ledesma, Hidalgo, México. Boletín de Mineralogía, vol.17, num.1, p.3-9.
- Floyd, P.A.** y Winchester, J.A., 1975. Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 27, p. 211 – 218.
- Fortescue, J.A.C.**, 1980. *Environmental Geochemistry* . Springer Verlag. 347p.
- Fries, C., Jr.** y Rincón-Orta, C., 1965. El basamento metamórfico en el noreste del Estado de Hidalgo. Instituto de Geología, Boletín, UNAM, v. 73, p. 67 – 70.
- García, E.**, 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM, 71p.
- García, R. E., De Los Santos, J.**, 1990. Verificación Geológico Regional del área de San Nicolas. Zona Huichapan, Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales. Archivo Tecnico. 15 p.
- Gastil, R.G.**, 1975. Plutonic zones in the Peninsular Ranges of southern California and northern Baja California. *Geology*, v. 3, p. 361 – 363
- Gobierno del Estado de Hidalgo**, 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo. 500 p.
- Goldschmidt, V.M.**, 1911. Die kontaktmetamorphose im Kristianiagebeit. *Vidensk-Skrifter I. Math-Naturv. Kl.*, Kristiana, 20.
- Gromet L.P.** y Silver, L.T., 1987. REE variations across the Peninsular Ranges Batholith: Implications for batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs. *Journal of Petrology*, v. 28 part I, p. 75 – 125.

- Gromet, L.P.** y Silver, L.T., 1983. Rare earth element distribution among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 47, p. 925 – 939.
- Hanson, G.N.** y Langmuir, C.H., 1978. Modelling of major elements in mantle – melt systems using trace–elements approaches. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 42, p. 728 – 741.
- Harris, N.B.W.**, Pearce, J.A. y Tindle, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *In*: Coward, M.P. and Reis, A.C. (eds.), *Collision Tectonics*, Sp. Public. Geol. Soc., v. 19, p. 67 – 81.
- Heim, A.**, 1940. The front rangers of the Sierra Madre Oriental, México, from Ciudad Victoria to Tamazunchale. *Eclogae Geol. Helv.*, v. 33, p. 314-362.
- Huitrón-Esquivel R.**, 1979. Reconocimiento geológico minero de la zona minera de Jacala, Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R.A.**, 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p. 523 – 548.
- Kay, R.W.**, 1978. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 4: 497-522.
- Kay, R.W.**, 1984. Elemental abundances relevant to identification of magma sources. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. A310, p. 535 – 547.
- Koljonen T.** y Rosenberg, R.J., 1974. Rare earth elements in granitic rocks. *Lithos*, v. 7, p. 249 – 261.
- Kramer, W., Siebel, W., Romer, R.L., Haase, G., Zimmer, M. y Ehrlichmann, R.** 2004. Geochemical and isotopic characteristics and evolution of the Jurassic volcanic arc between Arica (18°30' S) and Tocopilla (22°S), North Chilean Coastal Cordillera. *Chemie der Erde – Geochemistry*.
- Krige, D. G.**, 1951. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52: 119-139.

- Le Fort, P.**, 1981. Manaslu Leucogranite : A collision signature of the Himalaya. A model for its genesis and emplacement. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. B11, p.10545 - 10568.
- Mateu J., Morrel I.**, 2003, “Geoestadística y Modelos Matemáticos en Hidrogeología” Castelló de la plana: Publicaciones de la Universitat Juame I, D. L. 311 p.
- Matheron, G.**, 1962. *Traite de Geostatistique Apliquee*, Tome I. Memoires bureau de Recherches Geologiques et Minieres, N 24. Editions Bureau de Recherche et Minieres, Paris.
- McBratney, A. B., Webster, R. and Burgess, T. M.**, 1981. ‘The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I’, *Computers and Geosciences*. 7(4): 331-334
- McCarthy, T.S.** y Hasty, R.A., 1976. Trace element distribution patterns and their relationship to the crystallization of granitic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 40, p. 1351 – 1358.
- McCarthy, T.S.** y Kable, J.D., 1978. On the behavior of rare earth elements during partial melting of granitic rock. *Chemical Geology*, v. 22, p. 21 – 29.
- McSween, H.Y., Jr., Richarson, S.M., and Uhle, M.E., 2003. *Geochemistry Pathways and Processes*, 2<sup>nd</sup> edition, New York, p.1-3, 94-103.
- Miyashiro, A.**, 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins: *American Journal of Science*, v. 274, p. 324 – 355.
- MMAJ-JICA.**, 1982. Report on Geological Survey of The Pachuca – Zimapan area, central Mexico, phase III. Metal Mining Agency of Japan–Japan International Cooperation Agency, Government of Japan.
- Muir, J. M.**, 1936. Geology of Tampico region. *American Assoc. Petrol. Geol. Pub.*, 280p.
- Pearce, J.A.**, Harris, N.B.W. y Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, n. 4, p. 956 – 983.

- Raisz, E.**, 1964. Landforms of Mexico. Geography branch of the office of Naval Research. Plano de Provincias fisiográficas.
- Restovic – Pérez, I. V.**, 1973. “Estudio geológico minero del área La Encarnación, Municipio de Zimapán, Estado de Hidalgo. Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis profesional (inédita).
- Robertson, G. P.**, 1987. Geostatistics in Ecology: Interpolating with Know
- Rollinson H. R.**, 1993, “Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation”. Longman Scientific and Technical. Harlow, United Kingdom, 352 p.
- Rose A. W., Hawkes H. E. and Webb J. S.**, 1979, “Geochemistry in Mineral Exploration”. Academic Press. 657 p.
- Samper, F.J. y Carrera, J.**, 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Segerström, K.**, 1956. Estratigrafía y tectónica del Cenozoico entre México, DF. y Zimapán, Hidalgo. XX Congreso Geológico Internacional, guía de excursiones A-3 y C-1, p. 11 - 22 y también la A-14 y C-6, p. 311 – 323.
- Segerström, K.**, 1961a. Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y noreste del Estado de México. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 13, p. 147 – 168.
- Segerström, K.**, 1961b. Geology of the Bernal-Jalpan area, Estado de Querétaro, México. US Geological Survey Bulletin 1104-B, p. 19 – 85
- Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológico – Minero, San Nicolás, Hidalgo, México (F14C59). Gobierno Federal.
- Siegel F. R.**, 1992, “Geoquímica Aplicada”. Editado por OEA Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D. C. 170 p.
- Suter, M. y Quintero, O.**, 1992. Active faults and state of stress in central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. 1.- The Venta de Bravo Fault. Journal of Geophysical Research. v. 97, n. B8, p. 983 – 993.

- Suter, M.**, 1980. Tectonics of the external part of the Sierra Madre Oriental foreland thrust-and-fold belt between Xilitla and the Moctezuma river (Hidalgo and Queretaro states). *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, v. 4, p. 19 – 31.
- Suter, M.**, 1982a. Itinerario, Zimapán-Jiliapan. Memoria de la Convención Geológica Nacional, Sociedad Geológica Mexicana, no. 6. México, D.F. Libro de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro, p. 43 – 51.
- Suter, M.**, 1982b. Itinerario, Puerto La Estancia-Jagüey Colorado-Zimapán. Memoria de la Convención Geológica Nacional, Sociedad Geológica Mexicana, no. 6. México, D.F. Libro de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro, p. 56 – 64.
- Suter, M.**, 1984. Cordilleran deformation along the eastern edge of the Valles - San Luis Potosí carbonate platform, Sierra Madre Oriental fold thrust belt, east - central México. *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, p. 1387 – 1397.
- Suter, M.**, 1987. Structural traverse across the Sierra Madre Oriental fold - thrust belt in east - central México. *Bulletin of The Geological Society of America*. v. 98, p. 249 – 264.
- Thompson, R.N.**, Morrison, M.A., Hendry, G.L. y Parry, S.J., 1984. An Assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. A310, p. 549 – 590.
- Thompson, R.N.**, Morrison, M.A., Matthey, D.P., Dickin, A.P. y Moorbath, S., 1980. An Assessment of the Th–Hf–Ta diagram as a discriminant for the tectonomagmatic classifications and in the detection of crustal contamination of magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 50, p. 1 – 10.
- Viladevall, M.; Font, X.; Carmona Jose, M<sup>a</sup>.; Casas, A.; Navarro, A.**, 2007. Geochemical characterisation of the Catalonian coastal ranges (Barcelona-Girona, NE Spain) using stream sediments.: Poster. 23rd International Applied geochemistry symposium (IAGS). Exploring our Environment. Oviedo (ESPAÑA)

- 
- Wackernagel, H.**, 1995. Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. Springer-Verlag, Berlín. Variance. Ecology 68(3) : 744-748.
- Whalen, J.B.**, Currie, K.L. y Chapell, B.W., 1987. A-Type Granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineral and Petrology, v. 95, p. 407 – 419.
- White, A.J.R.** y **Chapell, B.W.**, 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. Tectonophysics, v. 43, p. 7 – 22.
- White, A.J.R.**, 1979. Sources of granitic magmas. Geological Society of America. Abstract with Programs, v. 11, p. 539.
- Wilson, B. W., Hernandez, J.P., y Meave, T.E.**, 1955. Un banco calizo del Cretacico en la parte oriental del Estado de Queretaro: Bol. Soc. Geol. Mexicana, v.18, p. 1-10.
- Wood, D.A., Joron, J.L. y Treuil, M.**, 1979. A re-appraisal of the use of the trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. Earth and Planetary Sciences Letters, v. 45, p. 326 – 336.
- Zamorano-Téllez, J.A., Flores-Castro, K., Cadena, J.L., Hernandez, J., Ramirez, M., Magos, E.M., Mendoza, M.**, 2009. Prospección Geoquímica Por Oro En El Área De Influencia Del Intrusivo El Calvario, Jacala De Ledesma, Hidalgo, México. Actas INAGEQ 2009.

**GLOSARIO**

**Acicular:** adj. (del latín *acicala* pequeña aguja). En forma de aguja.

**Afloramiento:** Parte de un terreno que se encuentra en la superficie de la tierra.

**Aluvi3n:** Sedimento no consolidado depositado por un r3o.

**Amonites:** (de *Amon* uno de los nombre de Júpiter, representado con unos cuernos de carnero). Grupo de los Cefalópodos Amonoideos caracterizado por la situación del sif3n en el lado ventral y el dibujo de las líneas y el dibujo de las líneas de sutura que representan sillas y l3bulos recortados. Son f3siles estratigráficos característicos del Jurásico y del Cretácico, y al final de este periodo desaparecen bruscamente.

**Anticlinal:** Pliegue de estratos sedimentarios que recuerda a un arco.

**Anticlinorio:** Pliegue, deformaci3n resultante de la flexi3n o torsi3n de las rocas.

**Ap3fisis:** (del griego *apophusis*, brote de un árbol). En petrología parte saliente y alargada de un batolito.

**Arenisca:** Roca sedimentaria detrítica compuesta de por lo menos 85% de granos de cuarzo más o menos redondeados de 1/16 mm (62.5 µm) a 2 mm de diámetro.

**Banco:** Dep3sito de un mineral generalmente no metálico que se encuentra en fase de exploraci3n y/o explotaci3n.

**Bandeado:** Sucesi3n alternante de láminas química, mineral3gica o texturalmente diferentes, originada por procesos geol3gicos diversos en un dep3sito o roca.

**Basalto:** Roca magmática efusiva (que se extiende al alcanzar la superficie).

**Beneficio:** Proceso metalúrgico al que se somete el mineral extraído de una mina para obtener un producto con las características y la pureza requeridas por el mercado.

**Bioclasto:** (del ingles *biclast* y a su vez del griego *bios*, vida y *klastos*, quebrado) En una roca, cualquier elemento f3sil entero o más frecuentemente en fragmentos, de origen animal o

vegetal que haya sido o no transportado. Este término se aplica esencialmente a los fragmentos de fósiles con caparazón carbonatado, e implica, que los fósiles son penecontemporáneos del sedimento en el que se encuentran. No se consideran organismos cuyos caparazones agrupados en posición de vida dan formaciones calcáreas (o calizas arrecifales o biolititas).

**Brillo:** Aspecto general de la superficie de un mineral cuando se refleja la luz.

**Cabalgadura:** Ocasionada por un movimiento tectónico, que la lleva a cubrir un conjunto con otro.

**Calcáreo:** Que contiene caliza.

**Caliza:** Roca sedimentaria carbonatada que contiene al menos 50% de  $\text{CaCO}_3$ , bajo la acción ácido diluido produce efervescencia.

**Cartografía:** Conjunto de técnicas y de artes gráficas que permiten la elaboración de mapas y su impresión.

**Circón:** (o zircón) Nesosilicato  $\text{ZrSiO}_4$  con frecuencia trazas de Th y U, del sistema tetragonal, en pequeños prismas alargados o en granos redondeados, con exfoliación imperfecta y fractura concoidea y desigual, de brillo vítreo o adamantino y colores variados: incoloro, pardo, amarillo, verde, gris.

**Clasto:** Proviene del griego *glastos* que significa roto en pedazos. Se refiere a cualquier fragmento de roca, fósil o cristal incluido en una roca.

**Concesión minera:** Parte de un terreno de dominio público cedida a un particular o a una empresa con el fin de que la retenga, la explore o la explote, de acuerdo con la legislación vigente en materia de minería. Su solicitud se conoce como *denuncio minero*.

**Conglomerado:** Roca sedimentaria detrítica formada al menos en un 50% por elementos.

**Contacto:** (geológico). Hecho de tocarse dos materiales. Superficie que separa dos materiales.

**Cuenca, cuenca sedimentaria:** Depresión de la corteza terrestre de morfología y dimensiones muy variables, normalmente situada en el interior o en el margen de los continentes, la cual es o ha sido un lugar de sedimentación actual o antiguo.

**Cuerpo plutónico:** Macizo formado de roca ígnea intrusiva en forma de gran masa ovoide o de gran lentejón.

**Depósito mineral:** Concentración natural de una o varias sustancias minerales útiles. En el caso de haber sido o poder ser objeto de explotación minera se denomina *yacimiento mineral*.

**Diaclasa:** Fractura que atraviesa una roca y no muestra ningún desplazamiento relativo apreciable de un lado de la fractura con respecto al otro.

**Dique:** (del inglés *dike*, rompeolas). Cuerpo de forma laminar de roca magmática, con potencia variable desde algunas decenas a centenas de metros, que atraviesa las estructuras de la roca encajante. A causa de la erosión puede dar lugar a un relieve en forma de muralla.

**Discordancia:** (del latín *discordare*, estar en desacuerdo). Reposo estratigráfico de una formación sedimentaria sobre un sustrato plegado o basculado precedentemente por esfuerzos tectónicos y en parte erosionado.

**Distrito minero:** Parte de una *provincia metalogenética*, de extensión arbitraria que contiene diversos yacimientos minerales y forman un sistema o un conjunto en común.

**Erosión:** (del latín *erodere*, roer). Conjunto de fenómenos externos que, en la superficie del suelo o a escasa profundidad, quita en todo o en parte los materiales existentes modificando el relieve.

**Escala de Mohs:** La escala de Mohs es utilizada para medir la dureza de una sustancia. Fue propuesta por Friedrich Mohs y se basa en el principio que una sustancia dura puede rayar una sustancia más blanda pero no es posible al revés. Escogió 10 minerales a los que atribuyó un determinado grado en su escala empezando con el talco que recibió el número 1 y terminando con el diamante al que se asignó el número 10.

**Estratificación:** Disposición de los sedimentos o rocas sedimentarias en estratos superpuestos.

**Exfoliación:** Propiedad física que tiene un mineral que al aplicarle una fuerza necesaria se rompe de manera que deje dos superficies planas.

**Exploración:** Conjunto de estudios y reconocimientos del terreno encaminados al descubrimiento de recursos minerales.

**Explotación:** Conjunto de métodos y de labores mineras que tienen por objeto la obtención de materias primas minerales.

**Extrusión:** Consiste en la utilización de un flujo continuo de materias primas para la obtención de productos, generalmente metalúrgicos, plásticos y alimenticios (Aperitivos con formas, alimento de Mascotas). Las materias primas se someten a fusión, transporte, presión y deformación.

**Facies:** Categoría en la que puede clasificarse una roca o un terreno y que está determinada por uno o varios caracteres litológicos o paleontológicos. Este término se usa igualmente para designar una categoría correspondiente a un medio o dominio sedimentario.

**Falla:** Fractura de las capas geológicas, acompañada de un desplazamiento vertical, oblicuo, u horizontal de los bloques.

**Fanerítica:** Término usado para indicar la textura de granulometría gruesa de ciertas rocas ígneas, en las que los granos minerales son suficientemente grandes para identificarlos en una muestra de mano. Las rocas de textura fanerítica son características para intrusiones (rocas plutónicas) y para los núcleos de cuerpos extrusivos grandes (rocas volcánicas), que enfrían lentamente y permiten un crecimiento de minerales grandes.

**Feldespato:** Sílice-aluminato potásico, sódico o cálcico.

**Fluvio-lacustre:** Se dice de sedimentos continentales cuyo origen es mixto (aluvial, aportes de arena y arcilla) y lacustre (depósitos de caliza).

**Formación:** Conjunto de terrenos que poseen características comunes y constituyen un conjunto que se juzga útil diferenciar. Conjunto de estratos que forman una unidad litológica a la que se asocia generalmente el nombre de un lugar.

**Fractura:** En mineralogía, la manera como se rompe cuando no se exfolia o parte.

**Fundente:** Aditivo que se aplica al caldo metálico para bajar el punto de fusión en las aleaciones.

**Ganga:** Término minero que se designa en cada yacimiento particular el conjunto de minerales sin interés práctico, generalmente no metálicos, asociado a una MENA en explotación o explotable, generalmente metálica. Término de origen francés, derivado, a su vez, de un término alemán que significa *veta*.

**Granítico:** adj. Se aplica a las rocas y macizos que presentan las características de un granito y al magma fundamental que les ha dado origen.

**Granitoide:** Término que designa al conjunto de los granitos.

**Granitos:** Tipo de rocas magmáticas plutónicas granudas (que muestran asociación de cristales, todos ellos detectables a simple vista).

**Granulita:** Roca metamórfica con cuarzo y feldespatos dominantes.

**Gravedad específica:** Es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua

**Gravimetría:** Es un método analítico cuantitativo, es decir que determina la cantidad de sustancia, midiendo el peso de la misma (por acción de la gravedad).

**Hábito:** Forma que toma una sustancia, un cuerpo o un objeto, especialmente en forma cristalina.

**Hidrografía:** Es una rama de la Geografía que se ocupa de la descripción y estudio sistemático de los diferentes cuerpos de agua planetarios, en especial, de las aguas continentales.

**Hidrotermal:** Relativo o perteneciente a aguas o fluidos acuosos con temperaturas superiores a la media ambiental.

**Holocristalino:** Todos los componentes que construyen la roca son cristales, por ejemplo evaporitas, y otras rocas plutónicas.

**Índice de refracción:** Es el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula. Se simboliza con la letra  $n$  y se trata de un valor adimensional.

**Inequigranular:** Los componentes que construyen la roca son de diferente tamaño de grano.

**Lacustre:** Habita o se desarrolla en un lago o en sus cercanías.

**Ley:** Contenido promedio de un determinado elemento químico en un yacimiento mineral, o en parte del mismo.

**Litológico:** Relativo a la naturaleza de las rocas.

**Lutita:** Roca sedimentaria detrítica cuyos componentes tienen un diámetro inferior a 1/16mm (62.5 $\mu$ m).

**Macla:** (del latín *macula*, mancha, malla, o del germánico *maskila*, malla) Asociación de cristales de la misma naturaleza según leyes geométricas precisas ligadas a los elementos de simetría del sistema cristalino considerado.

**Malla:** Es un colador o tamiz, se designan por un número; que es el número de alambres o aberturas que tiene el tamiz en una pulgada lineal.

**Mármol:** Roca metamórfica que deriva de calizas o de dolomías por metamorfismo de contacto o regional.

**Marmorizar:** Transformar en mármol.

**Mena o mineralización:** Asociación mineral que tiene sustancias útiles en una proporción y en cantidad suficientes para ser objeto de explotación. Términos que excluyen los materiales

de construcción y combustibles, y que suelen extenderse a asociaciones minerales sin potencial económico o de potencial desconocido. El termino *mena* es de origen occitano (provenzal) y significa *mina*.

**Metamorfismo:** Alteración de una roca en estado sólido debida a la elevación de temperatura y/o de presión, con cristalización de nuevos minerales.

**Mineral Industrial:** Sustancia mineral que tiene un valor económico, con excepción de los minerales que se extraen metales gemas y combustibles fósiles.

**Monoclínico:** Es uno de los posibles sistemas cristalinos. En el hay ángulos iguales entre si y dos ejes que forman entre si  $90^\circ$  y hace que en esta red aparezcan ejes binarios y planos de simetría.

**Muestra:** Porción de mineral, roca, suelo, fluido, etc., extraída para estudiar su composición, propiedades, contenido fósil, minerales, etcétera.

**Orogenia:** Proceso que conduce a la formación de relieves.

**Ortogneis:** Gneis derivado de rocas magmáticas.

**Paragneis:** Gneis derivado de rocas sedimentarias.

**Pelágico, a:** (del griego *pelagos*, alta mar). Se dice de los animales o vegetales marinos que no viven sobre el fondo marino, si no que nadan o flotan (formando respectivamente el necton y el plancton). Se aplica también a las rocas sedimentarias que no contienen más que faunas (micro o macro) pelágicas, cuyos elementos son de origen químico y biológico, o bien detríticos pero muy finos.

**Periodo:** División geocronológica utilizada en estratigrafía. (de semisesintegración), para un elemento radioactivo, lapso de tiempo durante el cual pierde la mitad de su masa.

**Petrografía:** Rama de la geología que trata de la descripción y la clasificación de las rocas.

**Petrología:** Rama de la geología que estudia el origen, la formación y la evolución temporal de las rocas.

**Piroxenoide:** (de piroxeno y del griego *eidos*, aspecto), inosilicato del sistema triclínico que constituye una familia cuyos principales minerales son: wollastonita y rodonita.

**Plegamiento:** Fase de deformación que se traduce especialmente por pliegues.

**Poiquilitica:** Textura caracterizada por presentar cristales de gran tamaño que contiene numerosos cristalitas de otro mineral.

**Polímeros:** Polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

**Polimíctico:** Tipo de conglomerado o brecha constituido por clastos provenientes de diferentes tipos de roca, cementados por una matriz fina.

**Polimorfismo:** Capacidad de un material sólido de existir en más de una forma o estructura cristalina. Por ejemplo, el diamante y el grafito son polimorfos del carbono. Cuando esta propiedad se da en compuestos formados por un único elemento se denomina también alotropía.

**Pórfido:** Roca ígnea extrusiva que presenta una textura constituida por *fenocristales* (cristales grandes) dispersos en una matriz de grano fino o de vidrio. Se denominan *pórfidos cupríferos*, *pórfidos auríferos*, *pórfidos molibdeníferos*, *pórfidos estanníferos*, etc., los pórfidos graníticos calcialcalinos que presentan mineralizaciones asociadas en cobre, oro, molibdeno, estaño y otros metales que constituyen una tipología denominada aquí *depósitos metalíferos en pórfidos*.

**Protolito:** Roca que por erosión mecánica, dio origen a los componentes detríticos de un sedimento.

**Refractariedad:** Propiedad de los materiales de resistir los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones.

**Reservas:** Cantidad de una sustancia todavía no aprovechada en un yacimiento mineral, cuya explotación sería viable tecnológica y económicamente. Según su grado de incertidumbre, de

menor a mayor se distinguen las *reservas medidas* y las *reservas inferidas*, la suma de las cuales serían las *reservas probables*.

**Rocas ígneas félsicas:** Aquellas donde predominan los minerales de feldespato potásico y cuarzo. Son de color claro.

**Rocas ígneas máficas:** Contienen feldespato cálcico y bajo contenido en sílice. Tienen un alto porcentaje de minerales ferromagnesianos, por lo que son normalmente más oscuras y densas que otras rocas ígneas que se encuentran en la superficie de la Tierra.

**Rocas ígneas:** Se forman cuando la roca derretida se enfría y se solidifica.

**Rocas metamórficas:** Formadas sin fusión a partir de rocas preexistentes, esencialmente debidas a un aumento de temperatura y presión.

**Solución o fluido hidrotermal:** Circulación de agua caliente (100 a 400° C) ligada a erupciones volcánicas o a la cristalización de un magma.

**Stock:** Plutón similar a un batolito, pero más pequeño.

**Trampas estratigráficas:** Son aquellas constituidas por la deformación de los estratos del subsuelo, causada por fallas (fracturas con desplazamiento) y plegamientos. Son aquellas originadas por cambios laterales y verticales en la porosidad de la roca. Se forman generalmente cuando desaparecido la continuidad de una roca porosa.

**Triclínico:** Es uno de los posibles sistemas cristalinos Hay tres ejes cristalográficos, ninguno de ellos a 90° entre sí: alfa es desigual de beta es desigual de gama es desigual de 90° .Los parámetros son desiguales.

**Volumetría:** Es una técnica de análisis químico cuantitativo. Se basa en la medida del volumen de una disolución de concentración conocida necesario para reaccionar completamente con el compuesto a determinar (analito).

**Vulcanosedimentario:** Se dice de secuencias compuestas en parte de material volcánico y en parte de sedimentos lacustres o marinos.

**Yacimiento mineral:** Concentración natural de una o varias sustancias minerales útiles, que es objeto de explotación minera o es susceptible de ser explotado produciendo un beneficio económico.

**Zona de Subducción:** Zona en la que se produce hundimiento en gran escala de una placa oceánica por debajo de otra placa, que puede ser oceánica o continental. En relación con dicha zona se origina una fosa oceánica a lo largo del límite entre las dos placas y un *arco magmático* sobre la placa superior.

---

# ANEXOS

## **Anexo A**

### **Clasificación de los depósitos de skarn**

La clasificación de los skarns se realiza con base con respecto al metal económico dominante (en base a Einaudi y. Burt, 1982). Existen cinco tipos principales que son: hierro, tungsteno, cobre, plomo - zinc y el de estaño - tungsteno.

#### **Skarn de Hierro**

Los skarn de hierro son producto de la intrusión diorítica, de troncos o diques de gabro o sienita y en ocasiones de diabasa. En el endoskarn están presentes la epidota y los piroxenos; dirigiéndonos en la interfase del endoskarn y el exoskarn localizamos ferrosilita, granate, epidota, magnetita, ilvaita, anfíbol, y clorita. El exoskarn está compuesto por magnetita en su mayoría; calcopirita, cobaltita y pirrotita; los metales asociados en estos skarn además del Fe son de Cu, Ca, y Au.

#### **Skarn de Tungsteno**

El tungsteno es el metal predominante, acompañado de Mo, Cu, y en menor cantidad Zn y Bi, formándose en el cuerpo schelita, molibdenita, calcopirita, esfalerita, pirrotita, magnetita, piritita y bismuto nativo. La morfología de los plutones es generalmente amplia y extensa, como los batolitos de cuarzodiorita o cuarzomonzonita; raras veces alaskita. Minerales como el piroxeno y la plagioclasa-muscovita-sulfuro, predominan en el endoskarn. Los primeros minerales en la aureola son ferrosilita - hedenbergita, granate, idocrasa y wollastonita. Posteriormente, espesartita, almandino, grosularita, idocrasa, hornbrenda, plagioclasa. Minerales con concentración elevada en Al, Fe, y bajos en S se presentan en el exoskarn.

### **Skarn de Cobre**

Siendo este nuestro objeto de estudio podemos decir que se forma en pequeños troncos y diques de Granodiorita o cuarzomonsonita, con epidota, piroxeno y granate; los metales asociados son el Mo, Zn, W y con gran presencia el Cu, ocurriendo en minerales como calcopirita, pirita, hematita, magnetita y arsenopirita, el exoskarn exhibe mineralización alta en Fe, S, y baja en Al y Mn. En la aureola se forman los primeros minerales: andradita, diópsido y wollastonita, siendo los últimos minerales: actinolita (clorita y montmorillonita).

### **Skarn de Plomo-Zinc**

Los troncos y diques granodioríticos, graníticos y dioríticos, aportan las condiciones adecuadas para formar con metales (Zn, Pb, Ag Cu y W); minerales como la esfalerita, galena, pirrotita, pirita, magnetita, calcopirita y arsenopirita, que se acompañan paragenéticamente con no metálicos como: epidota, piroxeno y granate y otros productos de la alteración argílica y propilítica que son menos abundantes. En la zona de la aureola de contacto, se ubican los minerales como: hedenbergita magnésica, granate andradítico, bustamita, rhodonita (como primeros minerales), y los últimos son actinolita, clorita, rodocrosita, entre otros. En el exoskarn encontramos minerales con concentración elevada en Fe, Mn, S y bajos en Al.

### **Skarn de Estaño - Tungsteno**

Los troncos y batolitos graníticos dan origen a este depósito; la casiterita schelita, esfalerita, pirrotita, pirita y arsenopirita presentes en el cuerpo dan pie a concluir que los metales asociados son Sn, F, W, Be y Zn. En la porción central del depósito encontramos idocrasa, espesartita, almandino; rico en Sn, andradita, malayaita, burita, datolita, anfíbol, mica, clorita, turmalina y fluorita. En el exterior del skarn se confinan minerales Alto en Al, F y bajo en Fe, S.

**Tabla AA1.-** Clasificación de los depósitos de Skarn en base al metal económico dominante

<b>Metal económico dominante</b>	<b>Hierro</b>	<b>Tungsteno</b>	<b>Cobre</b>	<b>Plomo-Zinc</b>	<b>Estaño-Tungsteno</b>
<b>Grado típico</b>	40 % Fe	0.7 % WO <sub>3</sub>	1-2 % Cu	9 % Zn, 6 % Pb, 5 oz/ton Ag	0.1-0.7 % Sn
<b>Metales asociados</b>	Fe, (Cu, Ca, Au)	W, Mo, Cu, (Zn, Bi)	Cu (MO, Zn, W)	Zn, Pb, Ag (Cu, W)	Sn, F, W, (Be, Zn)
<b>Roca ígnea asociada</b>	Gabro o sienita en su mayor parte diorita, algunos con diabasa	Cuarzodiorita o cuarzomonzonita, raras veces alaskita	Granodiorita o cuarzomonzonita	Granodiorita o granito, diorita o sienita	Granito
<b>Morfología plutónica</b>	Grandes o pequeños en troncos y diques	Plutones largos y batolitos	Pequeños troncos, diques	Troncos y diques	Troncos y batolitos
<b>Endoskarn (alteración exígne)</b>	Extensos en plutones volcánicos epidota-piroxeno	piroxeno y plagioclasa-muscovita-sulfuro	Epidota-piroxeno-granate	Epidota-piroxeno-granate	Muy raros
<b>Otros</b>	Amplios en silicatos de Na	Cuarzo-biotita-muscovita-sulfuro	Pueden ser muy amplios	Argílicos y propílicos	Greisen amplio
<b>Exoskarn</b>	Alto en Fe y bajo en Sn y Mn	Alto en Al, Fe, y bajo en S	Alto en Fe, S, y bajo en Al y Mn	Alto en Fe, Mn, S y bajo en Al	Alto en Al, F y bajo en Fe, S

<b>Primeros minerales</b>	Ferrosalita, grandita, epidota, magnetita	Ferrosalita-hedenbergita, grandita, idocrasa, wollastonita	Andradita, diópsido, wollastonita	Hedenbergita, granate andradítico, bustamita, rodonita	Idocrasa, espesartina, Granodiorita rica, Sn, andradita, malayaita, burita, datalita
<b>Últimos minerales</b>	Anfíbol, clorita, ilvaita	Espersantina, almandino, grandita, idocrasa, horbrenda, plagioclasa	Actinolita (Chorita, montmorillonita)	Actinolita(Mn), iluanita, clorita, dannemorita, rodocrosita	Anfíbol, mica, clorita, turmalina, fluorita
<b>Minerales del cuerpo</b>	Magnetita (calcopirita, cobaltita, pirrotita)	Schelita, molibdenita, calcopirita, (esfalerita, pirrotita, magnetita, pirita y Bi)	Calcopirita, pirita, hematita, magnetita, (calcopirita, arsenopirita)	Esfalerita, galena, pirrotita, pirita, magnetita, (calcopirita y arsenopirita)	Casiterita (schelita, esfalerita, pirrotita, pirita y arsenopirita)

TABLA AB1.- ELEMENTOS MAYORES (FRX)

Id. Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ZnO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PxC
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
JACFe-3	2.26	0.056	0.255	93.4	0	0	1.15	0.136	0	0.355	0.298	1.68	0.338	12
JAPO-5	48.2	0.978	13.6	4.74	0.302	2.03	26.7	0.087	2.46	0.241	0.153	0	0.0196	13.9
JAAR-12	8.47	0.95	0.19	50.3	0	1.09	0.531	0.01	0.185	0.04	38.4	0.0124	0	14.36
JAAR-13	27.2	0.142	0.917	55.9	0.548	6.14	2.25	0.018	0	0	6.96	0	0	3.34
JAAR-14	25.2	0.09	4.52	24	1.02	21.4	15.8	0.304	0	0.06	0.896	6.59	0	12.63
JAAR-15	15.6	1.52	2.89	57.5	0.999	1.75	8.59	0.166	0.506	0.344	10.1	0	0	1.55
JAAR-16	61.641	0.706	16.702	5.197	0.103	1.977	5.068	3.812	2.749	0.349	0	0	0	1.33
JASnD-NF-21	38.1	6.52	7.67	8.02	0.299	2.87	33.2	0.628	2.05	0.48	0.07	0	0	10.05
JASnD-NF-22	67.823	0.651	14.656	3.54	0.064	1.208	2.289	3.685	4.322	0.176	0	0	0	1.07
JANEP-25	58.2	0.96	16.71	6.81	0.12	2.82	5.59	3.57	2.39	0.34	0	0	0	0

TABLA AB2.- ELEMENTOS TRAZA (FRX)

Id. Muestra	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
JACFe-3	3	4	30	2	0	0	49	30	0	0	119	0	25	65
JAPO-5	49	140	2226	21	93	8	106	19	9	7	2	49	4	5
JAAR-12	4	2	28	0	0	0	239	117	0	0	1324	10	0	0
JAAR-13	3	6	24	0	2	0	77	24	0	0	411	96	1	8
JAAR-14	34	40	400	0	2	0	21	2	6	14	1665	26204	0	0
JAAR-15	4	23	92	0	59	7	310	136	0	58	58	31	1	30
JAAR-16	82	811	1329	21	203	11	96	24	4	7	19	49	4	10
JASnD-NF-21	28	355	311	17	917	97	254	82	4	14	16	82	12	32
JASnD-NF-22	196	186	689	40	267	20	47	26	9	10	8	57	16	29
JANEP-25	104.5	585	855.7	19.7	187.4	13.1	106.4	0	0	0.3	0	77.1	0	10.4

**TABLA AB3.- RESULTADOS DE ABSORCION ATOMICA DE SEDIMENTOS DE ARROYO (IZQUIERDA) Y ROCAS (DERECHA)**

#	Id. Muestras	X	Y	g/Ton
1	JAPñ-1	2314594.599	479458.9211	0.195
2	JAPb-2	2312488.994	481902.9756	0.375
3	JACN-4	2312895.042	479061.0989	0.305
4	JAAR-7	2314223.755	484036.422	0.467
5	JAAR-8	2313430.35	484304.2871	0.431
6	JAAR-9	2313239.675	484382.0964	0.105
7	JAAR-10	2312554.097	484410.3407	0.115
8	JAAR-11	2311654.177	483548.655	0.483
9	JACarrizal-17	2309468.232	487273.4653	0.445
10	JASnD-NF-20	2303100.215	489202.1768	0.4
11	JASnD-NF-23	2301742.568	487553.7473	0.06
12	JASnD-NF-24	2301742.568	487553.7473	0.13
13	M-1	2316569.33	482507.13	0.115
14	M-2	2316646.77	482637.12	0.07
15	M-3	2315507.25	481320.59	0.08
16	M-4	2315474.06	481505.9	0.065
17	M-5	2315474.06	481505.9	0.12
18	M-6	2315612.35	481378.67	0.04
19	M-7	2315612.35	481378.67	0.08
20	M-8	2315767.24	481785.25	0.025
21	M-9	2315792.13	481956.73	0.03
22	M-10	2315335.77	482697.97	0.035
23	M-11	2315283.22	482803.07	0.145
24	M-1-VBA	2316569.33	482507.13	0.055

Id. Muestras	Y	X	g/Ton
JACFe-3	2312934.27	479653.296	1.25
JAPO-5	2318100.49	483907.305	1.34
JAAR-12	2311546.59	483539.883	4.12
JAAR-13	2311546.59	483539.883	3.565
JAAR-14	2311546.59	483539.883	1.62
JAAR-15	2311546.59	483539.883	0.175
JAAR-16	2311654.18	483548.655	0.16
JASnD-NF-21	2303100.21	489202.177	0.055
JASnD-NF-22	2303100.21	489202.177	0.065
JANEP-25	2312860.05	480158.29	4.7

TABLA AB4.- LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS

Id. Muestra	Geográficas		UTM	
	Coordenadas N	Coordenadas W	Norte (Y)	Oeste (X)
JAPñ-1	20°55'53.9"	99°11'51.2"	2314594.599	479458.9211
JAPb-2	20°54'45.5"	99°10'26.5"	2312488.994	481902.9756
JACFe-3	20°54'59.9"	99°11'44.4"	2312934.274	479653.2965
JACN-4	20°54'58.6"	99°12'04.9"	2312895.042	479061.0989
JAPO-5	20°57'48.1"	99°09'17.3"	2318100.489	483907.3047
JAPO-6	20°57'48.1"	99°09'17.3"	2318100.489	483907.3047
JAAR-7	20°55'42."	99°09'12.7"	2314223.755	484036.422
JAAR-8	20°55'16.2"	99°09'03.4"	2313430.35	484304.2871
JAAR-9	20°55'10."	99°09'00.7"	2313239.675	484382.0964
JAAR-10	20°54'47.7"	99°08'59.7"	2312554.097	484410.3407
JAAR-11	20°54'18.4"	99°09'29.5"	2311654.177	483548.655
JAAR-12	20°54'14.9"	99°09'29.8"	2311546.588	483539.8828
JAAR-13	20°54'14.9"	99°09'29.8"	2311546.588	483539.8828
JAAR.14	20°54'14.9"	99°09'29.8"	2311546.588	483539.8828
JAAR-15	20°54'14.9"	99°09'29.8"	2311546.588	483539.8828
JAAR-16	20°54'18.4"	99°09'29.5"	2311654.177	483548.655
JACarrizal-17	20°53'07.4"	99°07'20.5"	2309468.232	487273.4653
JACSnD-18	20°51'06.5"	99°06'39.8"	2305750.671	488446.7685
JACSnD-19	20°51'06.5"	99°06'39.8"	2305750.671	488446.7685
JASnD-NF-20	20°49'40.3"	99°06'13.6"	2303100.215	489202.1768
JASnD-NF-21	20°49'40.3"	99°06'13.6"	2303100.215	489202.1768
JASnD-NF-22	20°49'40.3"	99°06'13.6"	2303100.215	489202.1768
JASnD-NF-23	20°48'56.1"	99°07'10.6"	2301742.568	487553.7473
JASnD-NF-24	20°48'56.1"	99°07'10.6"	2301742.568	487553.7473
JANEP-25			2312860.053	480158.29